

بانيش هوفمان
ميشيل باتي

نظرية الكم وقصتها الغريبة



ترجمة

محمد وائل الأتاسي

هيئة الطاقة الذرية السورية

بانيش هوفمان
ميشيل باتي

نظرية الكم
و
قصتها الغريبة

توجد ترجمة بعنوان قصة الكم المثيرة، قام بها أحمد مستجير في 210 صفحة، صدرت في القاهرة عن المؤسسة العامة للتأليف والنشر سنة 1965م، لدى مكتبة كلية العلوم بجامعة الفاتح بطرابلس نسخة منها.

ترجمة : محمد وائل الأتاسي

عنوان الكتاب باللغة الأجنبية

Banesh Hoffmann
Michel Paty

L'étrange histoire des Quanta

Éditions du Seuil

تقديم الترجمة

اكتشف علم ميكانيك الكم في عام ١٩٢٠ ليوضح فكرة ثبات الذرّة ، ولقد كان ذلك ــ دون شك ــ أحد أعظم الإنجازات في مجال الفيزياء النظرية لأنه يشكل النظرية الأساسية للظواهر الذرّية والظواهر الأصغر منها . ويمكن القول بأنه واحد من أعظم نظريتين ثوريتين في الفيزياء ظهرت في الثلث الأول من هذا القرن .

إن أُسس ومفاهيم وفرضيات نظرية الكم ، تختلف جذرياً عن تلك التي تعتمدها النظرية التقليدية (الكلاسيكية) ، والتي تتمكن من وصف الظواهر اليومية بنجاح ، فأُسس ميكانيك الكم موصوفة بلغة رياضية ، ولذلك توصف نظرية الكم بأنها نظرية رياضية .

ولأهمية هذا الموضوع ، وللنوعية الجيّدة لكتاب « نظرية الكم وقصتها الغريبة » لمؤلفيه «BANESH HOFFMANN & MICHEL PATY» اللذان يشرحان ميكانيك الكم شرحاً مبسطاً متكاملاً بعيداً عن التراكيب الرياضية الكثيفة ، فقد رأت إدارة هيئة الطاقة الذرية الموافقة على ترجمته إلى العربية ، التي قام بها مشكوراً الأخ السيد وائل أتاسي أستاذ الرياضيات في المدارس الثانوية والمُحاضر في الجامعات السورية والمشهود له بكفاءته العالية ، ووضعه في متناول القارئ العربي الذي يرغب أن يفهم أسس ميكانيك الكم وغرضه ويتمثله دون صعوبة .

ونأمل أن نكون بترجمة هذا الكتاب ونشره قد ساهمنا في تقديم مادة علمية قيّمة لأخوتنا وأبنائنا العلميين والمفكّرين في القطر العربي السوري والأقطار العربية الأخرى ، يستفيدون منها وهي بلغتهم الأم .

دمشق في ١٩٩٢/١٠/١٤

الدكتور إبراهيم حداد

المدير العام لهيئة الطاقة الذرية في سورية



كلمة لابد منها

لم يعد خافياً على أحد ، أو بحاجة إلى تعريف ، ما لنظرية الكم وانعكاساتها على الحوار الفلسفي من أهمية في العلم المعاصر . وكتاب هوفمان هذا ، الذي ظهر عام ١٩٤٧ تحت عنوان **نظرية الكم الغريبة** ، ثم ظهر في اللغة الفرنسية عام ١٩٦٧ تحت عنوان **قصة الكم الغريبة** ، هو خير ما كتب للدخول إلى عالم هذه المادة الصعبة بكل ما يمكن من السهولة واليسر . والآن ، وقد نفذت الطبعة الفرنسية ، فقد أصبحت إعادة طبع الكتاب ضرورية . ولكن لابد من إخراجه بحلة جديدة ، لأن نظرية الكم وإن كانت قد شيدت منذ مطلع الثلاثينيات ، إلا أنها عرفت من حين إلى آخر تطورات وتوسعات مرموقة ، سواء على صعيد معرفة المادة نفسها أم على صعيد اتضاح أصولها ومفاهيمها النظرية .

وكان بانيش هوفمان نفسه أول من جدد في الكتاب عام ١٩٥٩ ، وذلك بأن أضاف إلى نص عام ١٩٤٧ تذييلاً يشير فيه إلى الاكتشافات المستجدة في فيزياء النواة والجسيمات الأولية . ولكن الأمور تطورت منذ ذلك التاريخ تطوراً يحتاج الاطلاع على محتوياته إلى مؤلف كامل على الأقل ، حتى ولو عرضت عرضاً موجزاً مقتضباً . وهذا خير دليل على خصوبة نظرية الكم التي مكنتنا من اكتشاف واستطلاع آفاق جديدة في الفيزياء آخذة دوماً بالاتساع . وقد حاولنا أن نحيط في هذه الطبعة الجديدة بكل ما استجد في هذا الميدان . ولكننا لم نشأ أن نعالج فيزيائيات النواة والجسيمات بالتفصيل ، فحذفنا في هذه الطبعة الجديدة الفصلين الأخيرين من طبعة عام ١٩٦٧ اللذين يحملان العنوانين « خاتمة » و« تذييل » ، ووضعنا بدلاً عنهما جزءاً ثانياً نتصور أنه تكملة **لقصة**

هوفمان ، التي غالباً ما رواها في ثنايا كتابه على شكل رحلة في ربوع المادة . لذلك حاولت من جانبي أن أتابع هذه الرحلة ، وأن أستأنف عرض المناقشات الدائرة حول معرفة عالم الكم بصورة إجمالية (وهذا ما سيشكل جوهر الفصل الأول من الجزء الثاني ، الذي خصص لمشاهدات المسافر المرعبة في عالم الصغائر) . ثم حاولت في هذا السياق وصف كل ما عرض من مسائل عن **عدم قابلية الفصل الكمومي L'inséparabilité quantique** ومسائل **القياس** . وأخيراً ، حاولت أن أبين في الفصل الأخير الوجهة التي اتجهت فيها ، بعد عدة عقود ، شطحات نظرية الكم غير المتوقعة حول المادة الأولية .

عندما اقترح عليّ جان مارك ليفي ــ لوبلون[١] تحرير هذا القسم الجديد لمنشورات الدار **Seuil** ، شعرت بالفخر ، وفي الوقت نفسه بالجزع والتثبيط ، لأن القريحة المتدفقة عند مؤلف « نظرية الكم الغريبة »[٢] ، وروحانيته وشاعريته ، بدت لي مستحيلة لاسبيل للإتيان بمثلها . وأحمد الله أنه لم يطلب إليّ الاقتداء بها . لذلك وجدت من الأفضل أن أقنع نفسي بكتابة هذا الملحق الذي شعرت أنه ينسجم مع الطريقة التي فهم بها بانيش هوفمان نوع الجدة في الأفكار الكمومية ، وهكذا ، ما إن دبّ فيّ الحماس بعد الملاحظات العميقة الواردة في نصه ، ولاسيما تلك التي حدد معالمها في فصل « منظر عام جديد للعلم » ، حتى رأيت نفسي أمسك بالقلم وأرمي بنفسي في غمرة العمل .

ونحن طبعاً، لم نصدر هذه الطبعة الحالية إلا بعد موافقة بانيش هوفمان نفسه، لذلك فإني أتوجه إليه بالشكر الجزيل للثقة التي أولانيها وللملاحظات الثمينة التي أتاحت لي تعديل النص . كما أشكر أيضاً نقد القراء الأوائل لهذه التتمة وتشجيعهم لي واقتراحاتهم ، وهم أ . أسبيه **Alain Aspect** ، ف . باليبار **Françoise Balibar** ، عبد القادر بوشكور ، ج ، ل . لوبوس **J. Leite Lopes** ، جان ــ مارك ليفي ــ لوبلون Jean – Marc Levy – Leblond . ولاجدال طبعاً في أن كل نقص في القسم الثاني من هذا الكتاب تقع مسؤوليته على عاتقي وحدي .

---

(١) جان ــ مارك ليفي ــ لوبلون، أستاذ فيزياء ، يشرف على سلسلة الكتب العلمية التي تصدرها دار النشر Seuil ضمن مجموعة Points التي منها هذا الكتاب . (المترجم)

(٢) هذه هي الترجمة الحرفية لعنوان الكتاب الأصلي The strange theory of the quantum .

أما القسم الأول ، قسم بانيش هوفمان ، فقد ترك على حاله كما ترجمته منذ البدء السيدة س . ريشمونت (كما تركنا حواشيه الإضافية على حالها) . وهكذا فإن التعديل الوحيد الذي طرأ على النص القديم في هذه الطبعة هو حذف الفصلين الأخيرين اللذين أشرنا إليهما .

ميشيل باتي
ستراسبورغ ١٩٨١

القسم الأول

نظرية الكم وقصتها الغريبة

تأليف

بانيش هوفمان

كلمة شكر

أوجه شكراً خاصاً لأصدقائي كارل . ج . همبل : ميلبر فليبس ، مارك . و . زيمانسكي لاقتراحاتهم القيّمة الثمينة ولمعهد الدراسات العليا الذي فيه بدأ هذا الكتاب .

بانيش هوفمان

معهد الدراسات العليا

برنستون ، شباط ١٩٤٧



تمهيـد

إن الغرض من هذا الكتاب ، هو أن يكون دليلاً لأولئك الذين يودون الإلمام بأطراف النظريات التي يحاول العلماء بواسطتها فهم عالم الذرة المغلف بالأسرار . إذ إن المعرفة في عالم الذرة ، لاتقتصر على أسرار الانشطار النووي والقنابل الذرية ، بل إن خلف هذه المعـارف أفكـاراً عجيبـة وأحداثاً آسرة ، لولاها لكان فهمنا لحقائق الأمور هزيلاً تافهاً .

وتاريخ الكـم هو تاريخ بحث مضطرب يتـلمس طريقهم فيه علماء من بلاد مختلفة ، وعلى مدى جبهة واسعة لم تعرف الفيزياء مثيلاً لها أبداً ، جبهة أضاءت سماءَها ومضاتُ الإلهام وتهيأت لها أحياناً حوادث سعيدة وتوقعات موفقة ، وأزكتها أحياناً أخرى اتفاقات ومفارقات لايتوقع حدوثها إلا في قصص الخيال العلمي .

وقصة الكم قصة ثورة عارمة ، تروي لنا كيف تقوضت دعائم الفيزياء القديمة المغرورة التي ظلت تسود لأمد طويل مجالاً محدوداً ، ثم كيف تلت ذلك فترة من الجمود ليس فيها نظرية معتمدة ، فكان لابد لهذه الفيزياء من أن تتحطم بتناقضاتها الداخلية . وأخيراً كيف استمر هذا الوضع إلى أن برز في النهاية ، وبصوت مجلجل ، نظام يحمل عنواناً دقيقاً محدداً هو ميكانيك الكم .

إلا أن ميكانيك الكم ، على الرغم من إحكام سيادته على ميادين مكتشفة حديثاً ، فإن انتصـاره ليس كاملاً ، لأن خدوشـاً قد تبدو للوهلة الأولى لاضرر منها ، ولكنهـا تخط على صفحة مملكته أخاديد تكشف في حقيقة الأمر عن تصدعات مرعبة تتبين من خلالها ظلمة عميقة الجذور ، ولكنها تزين للمغامر الجسور حب الإقدام على

مغامرة جديدة . فميكانيك الكم لايمارس وحده سلطة مطلقة ، بل إنه يتقاسم الصلاحيات مع نظرية النسبية ، أي ذلك المتمرد الآخر . وعلى الرغم من أن هاتين النظريتين أدتا بالتعاون معاً إلى أكثر خطوات التقدم نفاذاً إلى المعرفة ، إلا أنه كتب عليهما حتى الساعة أن تظلا على خلاف بينهما . ولن ينتهي هذا الخلاف إلا يوم تقوم نظرية أقوى سلطة منهما ، لتطويهما تحت جناحيها وتكنس الأوهام التي بنيناها بالعرق والجهد ، ونعني بها أفكارنا الحالية عن المكان والزمان والمادة والإشعاع والسببية . وليس أمامنا الآن إلا أن نقدم الفروض والتخمينات حول طبيعة هذه النظرية ، إلا أن ظهورها في يوم من الأيام لايستمد يقينه إلا من يقيننا بأن حضارتنا ستستمر لا لأكثر ولا أقل .

ترى ما هذه الأشباح المتسلطة التي ندعوها المكان والزمان والتي لانستطيع بدونها إدراك عالمنا ؟ وما هذا الجوهر السري الغامض : المادة ، الذي يتكون منه جسمنا والأجسام التي حولنا ويتزيا أمامنا بأشكال عجيبة ، فنراه في الوقت نفسه سيد الروح وخادمها ، ويحتل في سلم مراتب الكون مركزاً مرموقاً من حيث أنه الأداة الأولى للخلق الإلهي ؟ وما هذه الرسل السماوية التي تفوق بسرعتها جميع الرسل ، ونعني بها الإشعاع الذي يقفز بسرعة البرق عبر هذا الفضاء الخالي المترامي الأطراف .

إنها أسئلة لا نعرف لها إجابة صحيحة . إلا أن العلم نذر نفسه للاهتمام بها ، فحكم عليه بألا يكف أبداً عن نسج سيل من النظريات والفروض حولها وأن يسعى جاهداً كي يضع يده على بذرة الحقيقة ليركن عليها بناه المعقدة . إلا أن توازن هذه الصروح النظرية مرهف ، حتى أن أدنى تغير فيه يثير اضطراباً ينتشر عبر البناء كله . فتاريخ النسبية يروي لنا ما الذي جرى عندما تخلت نظرية قديمة للمكان والزمان عن زمام السلطة لنظرية أخرى . كما يروي لنا تاريخ الكم عن المغامرات التي مرت بها حديثاً نظرياتنا حول المادة والإشعاع ، وعن نتائجها غير المرتقبة .

ثم إن موضوعاً على مثل هذا التجريد الذي يتمثل في نظرية الكم ، يمكن أن نتوقع له أن يكون مرتعاً خصباً لكتابات علمية عميقة تتناثر على صفحاتها رموز الرياضيات العليا المنفرة . ولكننا عرضنا القصة في هذا الكتاب دون رياضيات ، مع أننا لم نغفل عن ذكر أي مفهوم أساسي . هذا فضلاً عن أن القارئ سيلقي فيه نظرة على العالم

المتتبع للأمور النظرية وهو يقوم بعمله ويمسك بأدواته : الورقة والقلم ، ويعالج بعقله تجاربه التي يجريها على الأفكار والخواطر دون أن تنقصه طبعاً الموهبة في الوصول إلى نتائج صالحة انطـلاقـاً من مقدمات (قد يقرون فيما بعد بأنها غير صـالحة) . فهو يتحلى بالحدس والإلهام . وقد يهتدي بالظن أو بطريق مؤشر غامض أو بتشبيه إجمالي أو بتخمين جريء ، فهو في جميع الأحوال يصوغ فرضيات عمله بكل ما يقع تحت يده ، ويهتدي ببصيرة الحدس الإلهي ، ويتتبع بكـل جرأة أدنى بصيص أمل يمكن أن ينتهي به إلى اكتشـاف السبيل المؤدي إلى الحقيقة .

إن في ارتقاء الكم إلى تلك المكانة السامية في العلم الحديث وفي الفلسفة ، لقصة كانت لاتصدق في أغلب الأحوال ، ففيها تسير المأساة جنباً إلى جنب مع المغامرة العظيمة . إنها قصة مضطربة دون ترتيب . ولكن تحت هذا العماء والفوضى ، ينكشف شيئاً فشيئاً بناء رائع فخم . وكل اكتشاف ، مهما بدا في الظاهر خارجاً عن الموضوع وعار من كل مدلول ، لابد سيجد مكانه المناسب المقدر له في مجموع هذه المتاهة المعقدة التي ستسفر في نهاية الأمر عن أعظم اكتشافات العقل البشري التي سيخلدها التاريخ .



١ ــ توطئة

في إحدى زوايا مخبر غارق في ظلمة تامة ، كانت تنتصب آلة كهربائية تبدو فيها كرتان معدنيتان لامعتان ، تبديان ضيقاً وتبرماً من ضيق المسافة بينهما . وكان الجهاز في الحقيقة آلة معروفة جداً ، تستعمل عادة لإحداث الشرارات الكهربائية . وكل ما في الأمر أنه أضيف إليها شيء بسيط هو عبارة عن طبقين معدنيين ربطا إلى الكرتين بسلكين دقيقين موصلين ، فبدت الآلة وكأنها وحش أريد تزيينه بأذنين ضخمتين حول عينين واسعتين . وكان هناك على طاولة أخرى سوار بسيط لم يكتمل إغلاقه مكون من سلك نحاسي موضوع على ساق مصنوعة من مادة عازلة . وكانت الفتحة الصغيرة بين طرفي السلك (السوار) هي الجزء الهام من الجهاز كله بالنسبة للمجرب ، لأن السر كله سينكشف في هذه الفتحة إذا ما صدقت فرضياته .

كان كل شيء جاهزاً في مكانه ، فأكمل المجرب وصل الدارة وترك الشرارات « المطقطقة » تنطلق بين الكرتين . ولكي تألف عيناه الظلمة ، أدار ظهره للشرارات البراقة وراح يحملق في فتحة السوار . ترى هل كان يتخيل ، أم أن ما يراه حقيقة ؟ لقد رأى فعلاً بصيصاً من الضوء يحتل الفتحة بين طرفي السوار ؟ لكن من الصعب إعطاء حكم قاطع ، فلربما لم يكن ما يراه أكثر من فعل منعكس ، لذلك حرك اللولب بكل عناية.ليجعل طرفي السوار يقتربان ، فأخذ بصيص الضوء يبدو أشد وضوحاً وتألقاً كلما صغرت الفتحة واقترب الطرفان ، وظلا كذلك إلى أن أوشكا على التلامس ، فلم يعد هناك أدنى ريب في صحة ما يراه ، وعندئذ تنفس المجرب الصعداء بارتياح ، لقد كان ثمة شرارة صغيرة فعلاً تجتاز الفتحة .

وهكذا ، وبكل هذه البساطة ، اكتشف الإنسان لأول مرة إشارة الراديو وهو عالم بما يفعل . ولقد حدث ذلك في عام ١٨٨٧ . أما المجرب فكان الشاب الألماني والفيزيائي اللامع هنريش هيرتز Heinrich Hertz .

كانت قيمة اكتشافه من الناحية التجارية لاتقدر بمال . لذلك قد يتساءل البعض : لماذا ترك رجل واع مثل هيرتز فرصة هذا الاختراع ليستولي عليها ماركوني وليجني من استثمارها ثروة طائلة ؟ إنه سؤال يسأل حقاً .

الحقيقة إن انغماس هيرتز في هذه التجارب التاريخية ، لم يكن أبداً بقصد اختراع شيء عملي حتى وإن كان الراديو تلغراف . بل ربما لم يكن الراديو تلغراف هو الوجه الاكثر تعبيرا من حيث النتيجة في هذه التجارب . فهيرتز كان يصب كل اهتمامه على ناحية ثبطت عزيمة العلماء منذ عهد طويل ، ونعني بها اختبار صحة نظرية هي على درجة عالية من التجريد الرياضي تتعلق بظواهر الضوء والكهرباء والمغناطيسية . وهي نظرية كان قد تقدم بها منذ ثلاثة وعشرين عاماً الفيزيائي الإيقوسي جيمس كلارك ماكسويل . أما التفكير في أن أعماله يمكن أن يكون لها وجه تجاري ، فهذا ما لم يدر في خلد هيرتز أبداً ، بل كل ما في الأمر أن شغله الشاغل بالبحث اللامبالي ، أو البحث لمجرد البحث ، هو الذي أدى عرضاً إلى هذا الوضع الذي قد يبدو مضحكاً إلى حدٍ ما . ولولا الكشف العلمي لما تعدى اهتمام هيرتز بهذه الظاهرة على الأرجح اهتمامه بظاهرة أخرى كان قد لاحظها في أثناء تجاربه ، ولكن لم يكن لها في الظاهر أي معنى . غير أن هذه التجارب كان ينظر إليها عامة الفيزيائيين على أنها ترسخ بصورة نهائية صحة نظرية ماكسويل وتقيمها على دعائم تجريبية صلبة كالصخر . ومع ذلك فإن الظاهرة التي كانت في الظاهر لامعنى لها ، قدر لها أن تلعب على يد أينشتين دوراً رئيسياً في تطور نظرية الكم ، كما وجهت في الوقت نفسه لطمة قوية لنظرية ماكسويل التي لم تستطع بعدها أبداً أن تستعيد مكانتها السابقة .

ولكي نقدر أعمال ماكسويل وهيرتز وكل تاريخ نظرية الكم حق قدرها ، علينا أن نلقي في البدء نظرة سريعة على بعض النظريات التي افترضت في موضوع الضوء .

« فمنذ القديم كانت الشمس ، التي هي مصدر الضياء ، مثار إعجاب الإنسان ودهشته . وكانت عبادة الشمس أمراً شائعاً عند الشعوب القديمة . كما أن الديانات الوثنية وغير الوثنية أشادت بالضوء وجعلته رمزاً للخير والحق ، ولكنه لم يكن بالنسبة لها سوى حالة (أو ظرف) معاكس لحالة الظلمة ، ففي النور يستطيع الإنسان أن يميز الأشياء ويراها[1] .

بيد أن اليونانيين الذين يتمتعون بحساسية علمية أكيدة ، أتوا بفكرة جديدة هامة جداً . فقد عرفوا أن لابد من وجود شيء يتوسط المسافات التي تفصل أعيننا عن الأشياء التي نراها وعن المصابيح التي تنيرها . فعزوا إلى هذا الشيء حقيقة موضوعية راحوا يدرسونها ويحيكون حولها النظريات . وما الشيء الذي يفكر فيه العالم حالياً عندما يدرس الضوء سوى هذا الشيء الموضوعي . فإدراك هذه الحقيقة ، ونعني بها ذلك التمييز بين مجرد الإحساس بالقدرة على رؤية الأشياء وبين الضوء الذي بدئ النظر إليه بهذه النظرة الجديدة الموضوعية ، هو النقطة الحاسمة في تاريخ دراسة الضوء . واكتشاف الفرق بين الأمرين ، كاكتشاف الطفل للفرق بين إحساسه بحجر يفجه وبين الحجر الذي اجتاز مسافة فعلية لكي يفجه . هذا ، مع مراعاة الفارق الكبير بين سرعة انتقال الضوء الذي يكاد يكون آنياً ويصعب بالتالي إدراك حقيقة انتقاله وبين سرعة انتقال الحجر .

غير أن اليونانيين ، على الرغم من أنهم بدؤوا بداية واعدة بالنسبة للدراسات الضوئية ، إلا أنهم راحوا يتخبطون في نظريات متضاربة لم يستطيعوا الخلاص منها ، فإحدى نظرياتهم تقول إن الضوء نوع من التيار يخرج من العيون كما يخرج الماء من الأنبوب . وفكرتهم في ذلك أن رؤيتنا لشيء ما تتم بتوجيه هذا التيار إليه ، وذلك لكي ندركه مثلما يدرك الأعمى وجود الشيء حين يمد إليه عصاه ليلمسه . وهذه النظرية تفسر السبب في أن الإنسان لايرى إلا ما هو أمامه ، وأنه لايرى وعيونه مغلقة . ولكن هذه النظرية تعجز عن تفسير السبب في أننا لا نرى في الظلام مثلاً . وفي محاولة للرد على

(١) هذه الفقرة ليست ترجمة للأصل . ولقد فصلنا هذه عنها لأن الأصل بدأ التاريخ القديم للضوء من العبريين وكأنهم أقدم شعوب الأرض ، علماً أن العبريين ليس لهم حضارة قديمة ذات أثر ، وهناك شعوب كثيرة فاقتهم حضارة وثقافة ، وهي أقدم منهم ، بل لقد دونوا تجارب شعوبهم بوعي يفوق بمرات وعي العبريين لتجربتهم التي لم تكن سوى سرقة لتجارب الشعوب الأخرى التي كانت تقطن المنطقة . (المترجم)

اعتراضـــات كهذه ، وضع أفلاطون نظرية لاشك أنها فريدة في نوعها ، وذلك بسبب إسرافها في الآليات الغامضة . إذ اقترح تفاعلاً ثلاثياً بين ثلاثة تيارات مختلفة : أحدها يصدر عن العينين ، والآخر يصدر عن الشيء المشاهد ، والثالث يصدر عن المصباح الذي ينير الشيء . وكانت العثرة التي اصطدمت بها نظرية أفلاطون هي أن الاتجاه الذي عزاه للتيار الأول ، يتجه من العين إلى الشيء . في حين أن فكرتنا الحالية تقول : إننا نرى الشيء لأن الضوء الوارد منه ينفذ إلى عيوننا بدلاً من أن يخرج منها . والطريف في الأمر ، أن هذه الفكرة الأخيرة البسيطة ، هي التي نادى بها فيثاغورث العظيم قبل أفلاطون بأكثر من قرن . وكانت فكرة فيثاغورث بسيطة للغاية : لقد اعتبر الضوء شيئاً يصدر عن كل جسم مضيء وفي جميع الاتجاهات ، وهو لايصطدم بحاجز إلا ويثب من جديد ، فإذا صادف ونفذ إلى عيوننا ، فإنه يحدث فينا الإحساس برؤية الشيء الذي وثب عنه آخر مرة قبل النفاذ إلى عيوننا[1] .

والطبيعـة سخيـة جداً في بعـثرة الضـوء . وهي تبدي لنـا في هذا الميدان وجهـاً خـارق العطـاء والكـرم . فكـأنها تود أن تكون على يقـين تام من أنها جذبت أنظارنا نحوها ، فتبدد عن سعة وكرم زائدين فيضاً من ضيائها ، ولاتبدي شيئاً من بخلها الذي تبديه عندما نعصر ليمونة ، إذ تسدد رذاذها بكل دقة ، ولكن في العين .

على أن مشكـلة الضـوء لم تُحـل طبعـاً ، على الإطلاق ، بهذه النظرية .

---

(١) يسير المؤلف على عادة الأوربيين والغربيين عامة في إرجاعهم كل معرفة وكل نتاج علمي إلى اليونانين.وعلى الرغم من أنه يبدي أسفه لتخبط اليونانيين في شأن الضوء ، إلا أنه أرجع فكرة الضوء كشيء إلى فيثاغورث . ولكن فيثاغورث لم يؤلف كتباً ، ولذلك لاندري مدى صحة إرجاع أي معرفة إليه . والحقيقة أن دراسة الضوء دراسة علمية باعتباره شيئاً موضوعياً ينتقل في مكان وزمان ، وتشبيهه بالكرات المرنة التي ترتد عـن السطوح الصقيلة أو التي تنفذ من وسط إلى آخر ، هذه الدراسة كان أول من قام بها الحسن بن الهيثم في القرن العاشر الميلادي ، وشرح كل ذلك في كتابه عن البصريات . وقد عرفت هذه الدراسة في أوروبة بعد أن ترجم كتابه ، حتى قبل عصر النهضة ، إلى اللغة اللاتينية . وقد فسر ابن الهيثم كيف يعم الضياء أرجاء المكان بعد انعكاسات متتالية ، أو عن طريق الانكسار وكيف تتم رؤية الأشياء المضيئة من ذاتها أو المضاءة بغيرها . وأعطى وصفاً صحيحاً للعين هو الأول من نوعه في تاريخ العلم . كما أعطى تفسيراً مشبعاً بالروح الرياضية ، هذا فضلاً عن قيامه بتجارب دوّن نتائجها وخلص منها إلى نتائج هامة في حالة الانعطاف ، وصمم أدوات خاصة لهذا الغرض ، الأمر الذي لم يعرفه لااليونانيون ولاغيرهم من الشعوب القديمة . (المترجم)

بـل لنقـل إن متـاعبنـا قد بدأت بها . فهي ككـل اكتشـاف جديد في العـلم ، تجر معها سيلاً من المسائل والمتطلبات الجديدة . أي تماماً كاختراع السيارة الذي جر معه الحاجة إلى محطات للوقود وطرقات معبدة ومرائب وميكانيكيين وآلاف الاحتياجات الأخرى الجانبية . وهنا أيضاً ، فمنذ أن أدركنا ضرورة وجود شيء يؤمن الصلة بين عيوننا وبين الأشياء المشاهدة ـــ شيء كنا قد دعوناه « الضوء » ـــ فتحنا الأبواب كلها لسيل من الأسئلة المتعلقة بهذا الشيء . ولاشك في أن هذه الأسئلة ماكانت لتخطر لنا على بال ما لم نتأكد من وجود هذا الشيء الحقيقي : « الضوء » . فمثلاً : ما شكله ؟ ما قدره ؟ أله أصلاً شكل ما أو قدر ؟ أهو من طبيعة مادية أم « أثيرية » ؟ أله وزن ؟ هل يزحزح الأجسام التي يصطدم بها ؟ أهو حار أم بارد ؟ بأي سرعة ينتشر ؟ أهو مندفع أصلاً بحركة ما ؟ وإذا لم يكن بإمكانه اختراق صفيحة رقيقة من الورق المقوى ، فكيف يتسنى له أن يخترق الزجاج ؟ هل الألوان المختلفة كلها تنتقل إلينا بالضوء نفسه ؟ إن هذه الأسئلة ، وأخرى أكثر إحراجاً منها ، ستجابهنا بمجرد أن نكتشف أن الضوء موجود .

وهذه الأسئلة طبعاً ، سنجد أجوبة لبعضها كلما تقدمنا في قصة الكم الجميلة . كما سيسرنا جداً منظر العلم وهو يغير من وجهة نظره من حين لآخر . على أن هناك أسئلة أخرى تخرج إجاباتها عن السياق الأساسي لقصتنا هذه ، لذلك لن تثار بعد الآن .

ولقد ظهرت نظريتـان مختلفتـان تشـرحان كيفيـة اجتيـاز الضـوء للفضـاء بقفـزة واحدة لكي ينقـل رسـالتـه إلى عيـوننـا . ولكي نأخـذ فكـرة عن هاتيـن النظريتين ، دعونا نبدأ بالسؤال : كيف نفعل لكي نحرك حجراً بعيداً عن متناول يدنا ؟ هناك في الحقيقة طريقتان تنسجم كل منهما مع واحدة من نظريتي الضوء ، الأولى هي أن نقذف شيئاً ما باتجاه الحجر ، والثانية هي أن ندفعه بعصا .

وفكـرة قذف شـيء مـا بـاتجاه الحجـر ، هي التي أوحت بـالنظريـة الأولى التي تدعى نظريـة الدقـائق أو النظـريـة الجسيميـة . وهي تقول إن الضوء مكون من ملايين الحبيبات الصغيرة أو « الجسيمات » التي تقذفها الأجسام المضيئة بسرعة هائلة في جميع الاتجاهات ، حتى لكأنها شظايا قنبلة لاتكف عن الانفجار .

أما النظرية الثانية التي تدعى نظرية الأمواج أو النظرية التموجية ، فقد صيغت على نمط التحريك بالعصا . وهذا أمر يحتاج إلى بعض الشرح . إذ لايتضح للوهلة الأولى أي وجه من أوجه الشبه بين دفع الحجر بواسطة العصا وبين الأمواج . ولكن دعونا نتذكر أن العصا مهما كانت صلبة ، فإنها لامحالة تقبل الانضغاط ولو بشكل خفيف جداً . ولكي نوضح هذه الحقيقة الهامة بشكل صريح ، دعونا نتخيل العصا مصنوعة من جيلاتين الفواكه (وهنا طبعاً لن يصدقنا أحد أن مثل هذه العصا قادرة على تحريك شيء ثقيل ، كالحجر مثلاً ، حتى لو قبلنا أصلاً بأنها سلمت من التهشيم تحت تأثير ثقلها الخاص) ولكن ، لما كنا نتكلم هنا بلغة العلم المجرد المحض ــ على الرغم من العلاقة الظاهرية مع المآكل ــ فمن حيث المبدأ الذي ينص هنا على أن العصا ــ أي عصا ــ لايمكن أن تكون تامة الصلابة ، فلامانع إذاً من أن نتخيلها مصنوعة من جيلاتين الفواكه . ولكن دعونا نضع كرة تنس الطاولة بدلاً من الحجر لكي نعطيها فرصة لتحريك شيء ما .

والآن ، ما الذي يحدث عندما نضغط على أحد طرفي العصا الجيلاتينية ؟ إن الطرف الآخر لن يتحرك مباشرة ، وإنما تسري في العصا نوع من الرعشة تستغرق بعض الوقت (مهما كان ضئيلاً) لكي تصل إلى الطرف الآخر ، وعندئذ يتحرك هذا الطرف ويحرك بدوره الكرة الصغيرة . وهذا الشيء نفسه يحدث أيضاً عندما ندفع حجراً بطرف عصا فولاذية ، ولكن مع اختلاف في معايير الشدة والتوتر . وإليكم الآن السؤال النهائي المهم : ترى ما الذي ينتقل بالضبط على طول العصا الجيلاتينية ؟ إنه اهتزاز أو مجرد رعشة ، أي أنه ليس شيئاً مادياً كالحجر المقذوف في التشبيه الأول ، وإنما هو شيء يصعب لمسه أو تحديده ، حتى لكأنه ابتسامة الجيوكاندة التي يستحيل معرفة كنهها . ولكنه شيء قادر ، مع ذلك ، على أن يحرك بسريانه كرة الطاولة . فإذا تأملنا الآن هذا المثال لكي نخلص منه إلى مغزاه الأساسي ، انتهينا إلى أن الضوء بإمكانه أن ينقل رسالته من مكان إلى آخر بأن يسلك سلوك الموجة . أي أننا نتوصل في حقيقة الأمر إلى نظرية تموجية للضوء .

ولكنها موجة في ماذا ، ما هو الوسط الذي يهتز ؟ فالموجة ــ أي موجة ــ

لايمكن أن تنشأ بذاتها ، ولابد لها أن تنتشر في شيء ما . إذاً ربما تنتشر في الهواء ؟ ولكن لا ، لأن الضوء يمكن أن ينتشر في الفراغ . وهذه الحقيقة وحدها ، تكفي لإثبات أن الأمر ليس أمر موجة تنتشر في وسط مادي ـــ مهما كان هذا الوسط . وإذا اخترقت مادة ما ، مهما كان شأنها ، الفراغ ، فإن هذا الفراغ لن يظل فراغاً كما كان . فهل سنرغم بعد ذلك على ترك هذه النظرية الخاطئة القائلة بوجود وسط يمكن أن تنتشر فيه موجتنا ؟ أبداً ، إطلاقاً ، فما من عالم سيترك نظرية ينتظر منها الكثير لمجرد أنها تحتاج إلى فرضية بسيطة لم تحظَ حتى الآن بمن يغنينا عنها . وهذه الفرضية التي عنيناها ، اللازمة والكافية ، هي التأكيد على وجود وسط لامادي موجود في كل مكان ويسلك فيه الضوء مسلك الموجة . وقد ارتؤي أن يعطى (نظراً لصفاته تلك) إسماً روحانياً ، إذ سمي بالفعل ، الأثير الحاضن للضوء . وكان المبرر الوحيد لوجود هذا الأثير هو دعم النظرية التموجية للضوء بإعطائها مسحة من المعقولية المزوقة .

وهكذا أصبحنا أمام نظريتين للضوء : النظرية الجسيمية ، والنظرية التموجية ، فأيهما هي الأصلح ياترى ؟

فالسير اسحق نيوتن الشهير ، الذي حقق مجمل اكتشافاته الأساسية حول الديناميك والجاذبية ، وحساب التفاضل والتكامل ، وكثير غيرها من أبواب العلم ، وفي فترة لاتتجاوز الاثني عشر عاماً ، وجد لديه متسعاً من الوقت في هذه الفترة ، لكي يحقق تقدماً ذا شأن في مجال البصريات . وقد فضل الأخذ بنظرية الجسيات : لأنه توقع أن الأمواج ، نظراً إلى أنها تنحرف عن مسارها عند التفافها حول الزوايا ، فهي لذلك لايمكن أن تفسر السبب في انتشار الضوء وفق خط مستقيم . وعلى الرغم من ذلك فقد كانت هناك معلومات قيمة حقاً ، ومعروفة في ذلك العصر حول الضوء ، ولم يكن يبدو أنها تتفق مع النظرية الجسيمية ، ولكن عبقرية نيوتن الفذة ، لم تجد صعوبة أبداً في تجاوز مثل هذه العقبات . فعندما أنهى أعماله ، كان قد نجح عملياً (بعد أن تخلى عن بساطة العرض) في إعطاء تفسير لجميع الظواهر المعروفة آنذاك عن الضوء ، إلا أن جسياته لم تكن عارية تماماً من بعض السمات المميزة التي نعرفها اليوم . فالوقائع التجريبية ألزمته في أن يعزو لها نوعاً فريداً من القدرة على الدفق ، وعلى معاودة الدفق ،

وذلك في حدود قدرتها الظاهرة على الانعكاس . وهكذا لم يكن الضوء ــ بحسب هذه النظرية ــ مماثلاً لطلقات بنادق الصيد ، بل كان أكثر قرابة لخفقان أجنحة الطيور المحلقة . وإذا قلنا إنه قد تبين في ضوء المعلومات التي أتت فيما بعد أن هذا الخفقان الإيقاعي هو على درجة قصوى من الأهمية ، فنحن نعني قولنا هذا فعلاً وبكل جدية .

وعلى الرغم من أن النظرية التموجية كان لها بعض المؤيدين في عهد نيوتن ، إلا أن حظها في النجاح كان ضئيلاً جداً تجاه عبقرية فذة لها مثل عظمة نيوتن . فالقائلون بالنظرية التموجية وعلى رأسهم الفيزيائي الهولاندي هويجنز ، بنوا كل آمالهم على حقيقة أن الضوء لو كان مؤلفاً من جسيمات ، لاصطدم بعضها ببعض كما هو مألوف ، في حين أن التجربة تثبت عكس ذلك وأن أشعة الضوء يمكن أن تتصالب دون أن يؤثر بعضها في بعض . إلا أن هذه الحقيقة وحدها لم تشكل أساساً كافياً لحسم النزاع ضد جسيمات نيوتن .

وبعد موت نيوتن ، تحققت اكتشافات تجريبية جديدة حول الضوء ، كما وضعت تقنيات حديثة كان غرضها دراسة رياضيات انتشار الأمواج المعقدة عن كثب . وهكذا تقدمت نظرية الأمواج على نظرية الجسيمات التي كادت تغيب في عالم النسيان ، هذا على الرغم من عبقرية الفكرة فيها ورغم بساطتها . ولم تعد هناك حاجة لإيجاد مبرر تجاه الاعتراض القائل بأن الأمواج تنحرف عند مرورها على الزوايا والحروف الحادة ، إذ اكتشف أن الأمواج الضوئية هي تموجات بسيطة تتباعد إحداها عن الأخرى بما يقرب من ١/٢٠٠٠ من المليمتر بين كل عرف والذي يليه . ولا شك أن تجعدات على مثل هذا الصغر والضآلة لا يمكن أبداً أن تنعرج بصورة ملحوظة . ولكن من المؤكد أنها تنعرج قليلاً على كل حال . وكان بالإمكان طبعاً استنتاج أن الضوء لايمكن أن يلقي بظلال محددة بكل دقة ، وإنما يشكل منظومات من الأهداب التي تتوضع على حواف الحزمة . ووجود مثل هذه الأهداب كان معروفاً في الأصل ، على كل حال ، في زمن نيوتن ، ولكن هذا الأخير لم يكن قادراً على إعطاء تفسير واضح مقنع لها . وهكذا دفعت جملة هذه الإيضاحات الجديدة بنظرية الجسيمات إلى عالم النسيان . وتمكن الفرنسي أوغوست فرينيل من رفع نظرية الأمواج ، بعد ما يقرب من مئة عام من موت نيوتن ، إلى

درجة من الكمال والإتقان بحيث أمكنها أن تنتزع من منافستها المهزومة عرش السيادة المطلقة . لقد طور فرينيل نظرية الضوء التموجية بمقدرة ورشاقة ، حتى لقد تيسر له أن يفسر جميع التجارب المعروفة في ذلك العصر رغم كثرتها وتعددها . وإذا كان لابد من إعطاء دليل إضافي على خطأ نظرية الجسيمات في ذلك العصر ، فقد أتى الدليل من التجربة الحاسمة التي أجراها فوكو فيما بعد والتي تمكن فيها من قياس سرعة انتشار الضوء في الماء . فهذه السرعة هي النقطة التي كانت النظريتان تختلفان حولها اختلافاً قاطعاً لالبس فيه . فالضوء ينتشر في الفراغ بسرعة تفوق الخيال وهي ٢٩٣٠٠٠ كيلومتر في الثانية . وبحسب نظرية نيوتن يجب أن تكون هذه السرعة في الماء أكبر من ذلك . أما النظرية التموجية فتؤكد أنها أقل . ولم يكن أمام العلم إلا أن ينتظر قدوم رجل مثل فوكو قادر على ابتكار طريقة تجريبية تساعد على قياس سرعات بمثل هذا القدر . وما أن أجريت التجربة حتى تبين أن سرعة الضوء في الماء أقل مما هي في الهواء ، بل إن الفرق كان مطابقاً تماماً لما توقعته النظرية التموجية . وهكذا أفل نجم نظرية الجسيمات والتمع في السماء منذ ذلك الحين ضوء نجم جديد هو ضوء النظرية التموجية .

والحق أن الشواهد على صحة هذه النظرية الأخيرة كانت ماحقة . بل سرعان ما تهيأ لها دعم أقوى من كل ما عداه . إذ لم يكد يمضي عصر فرينيل ، حتى عرفت العلوم القديمة حول الكهرباء والمغناطيسية ـــ التي كانت متوقفة إلى حد ما ـــ تجديداً ملحوظاً بعد التجارب التي قام بها الإنجليزي فارادي . فهذا الأخير وضع باكتشافه للتحريض الكهرطيسي واختراعه للمولد الكهربائي ، الأسس الأولى التي ستعتمد عليها إنجازات التقنيات الكهربائية التي نعرفها الآن .

إلا أن فرادي لم يكن يعرف من الرياضيات إلا النذر اليسير ، الأمر الذي كان بالنسبة إلى هذا المجال (الذي يتطلب الكثير من الرياضيات) عائقاً يستحيل تخطيه بالنسبة إلى شخص محدود الاطلاع .. ولكن هذه العقبة بالنسبة إلى فرادي كانت فرصة طيبة ، لأنها ألزمته أن يخط طريقه بنفسه وأن يبدع نظامه الوصفي الخاص به ، وذلك ليتفهم بمفرده وعلى طريقته هو نتائجه التجريبية . وكان هذا النظام الوصفي غاية في البساطة ، ولاسيما أنه لم يكن ذا طبيعة رياضية ظاهرة ، إذ كان مبنياً على

مـا دعـاه فرادي « أنـابيب القـوة » . وعلى الرغم من أن هذا الوصف كان يثير بعض الضحكات أحياناً لدى الرياضيين المختصين في ذلك العصر ، إلا أنه كشف في مجالات عديدة ، عن مزيـة يسمو بها على الأنظمـة الخاصـة بالرياضيـين . ففي الســابق كان الرياضيون يركزون بحثهـم على سـر التـأثيرات الكهرطيسيـة في قطع الحديد وفي لفائف السلك التي تولد هذه التأثيرات ، بينما فكر فرادي تفكيراً آخر . فبالنسبسة له هو ، فقد كان يعتقد بحق أن الكون كله مســاهم في هذه العمـليـة ، أما قطع الحديد واللفائف والمغناطيسات فليست سوى تفصيلات جانبية لاأهمية لها . حتى لقد كان تعارض وجهتي النظر بادياً في أبسط حالة ، وهي حالة مغناطيس يجذب قطعة حديد . فالرياضيون كانوا يظنون أن العنـاصر الأسـاسية في هذه الظاهرة هي المغناطيس ، وقطعة الحديد ، وعدد السنتيمترات الفاصلة بينهما . أما فرادي فلم يكن المغناطيس بالنسبة له قطعة عادية من المادة ، وإنما كان أخطبوطاً جباراً مصفحاً بالمعدن ويمد مجساته أو أذرعه الخفية في جميع الأرجاء حتى تلامس تخوم الكون اللانهائي ، وبهذه الأذرع التي دعاها فرادي أنابيب القوة المغناطيسية ، يستطيع المغناطيس جذب قطعة الحديد . لذلك كانت هذه الأذرع بالنسبة إلى فرادي هي العنصر الهام ، فهي التي تؤلف وحدها الحقيقة الجوهرية وليس قطعة المعدن العارضة الثانوية .

والحقيقــة أنـه مـا من اكتشــاف تجريبي إلا وكان يحمــل تـأكيـداً جديداً لأفكــار فرادي . إلا أن أنـابيب القـوة هذه ظـلـت تفتقر ولزمن طويل إلى دقة النظرية الرياضية التي لاغنى عنها . وظل الأمر كذلك لسنوات عديدة إلى أن بدأ مكسويل يهتم عن كثب بأفكار فرادي . فانبثق عن هذا الاهتمام إحدى أجمل وأحلى التعميات التي حدثت في تاريخ الفيزياء كلها . حتى ليصح أن نرفع هذا التعميم في الحقيقة إلى مستوى نظرية أينشتين النسبية ومستوى نظرية الكم نفسها . فالأولى تعزز بقوة شكل نظرية مكسويل ، والثانية تتصدى لأسسها نفسها .

إن مـا فعـله مكسـويل هو أنه بدأ بترجمة أفكـار فرادي ، التي كانت تبدو غامضـة مبهمة ، إلى لغة رياضية مألوفة أكثر . ولم تكن تلك بالمهمة اليسـيرة ، ولكن إنجازها برهن على أن أفكار فرادي لم تكن سوى لب الفكرة الرياضية . ومن هذه الأعمال

ولد مفهوم فيزيائي جديد هو مفهوم الحقل الذي استخدم فيما بعد أساساً بنيت عليه نظرية أينشتين النسبية المعممة . كما أن الحقل الكهرطيسي هو إلى حد ما ، الشكل الرياضي الأكثر صفاء لأنابيب القوى عند فرادي . وبدلاً من أن نتخيل الفضاء مليئاً بالعديد من المجسات (أو الأذرع) المنفصلة ، علينا أن نتخيلها وقد أذابت هويتها الخاصة في كيان ذراع واحدة مموهة موجودة في كل مكان هي الحقل الكهرطيسي . وهذا الأخير (أي الحقل) يجب أن يفهم على أنه حقيقة فيزيائية جوهرية هي حصيلة سائر هذه القوى والتوترات التي لاحصر لها ، والتي نستطيع ملاحظة مفعولاتها عندما يجذب المغناطيس قطع الحديد أو عندما يولد دينامو تياراً ، أو يسير قطار كهربائي ، أو تنقل موجة راديو كهربية صوتنا حول العالم بأسره . وقد دعي مسرح هذه التوترات ، الذي يشغل الكون كله ، أثيراً . ولكن كان لابد من التفريق بينه وبين الأثير الضوئي الذي تحتاجه نظرية الضوء التموجية . لذلك دعي الأثير الكهرطيسي .

ولم يكتفِ مكسويل بترجمة أفكار فرادي إلى شكل رياضي ، بل راح يطور نتائج النظرية الرياضية ويوسع مجالاتها ، فتعثر بعد حين بتناقض هو طبعاً ناجم عن أن الأمور لم تكن كلها تسير سيراً حسناً في النظرية ، أي أن العلاج الملائم كان يصعب تحديده . وقد بحث عنه علماء عديدون ومن بينهم مكسويل نفسه . وكانت نظرية الكهرباء والمغناطيسية قد أصبحت في ذلك الحين على درجة عالية من التشذيب والحبكة الرياضية حتى أن مكسويل عندما اكتشف العلاج بهدي من الإلهام المحض المبني على القياسات والتشبيهات والتخمين ، حصل على جملة من المعادلات التي لايبدو عليها أنها تختلف كثيراً عن المعادلات القديمة ، إلا أن هذه المعادلات الجديدة لم تكتفِ بإزالة التناقض المذكور ، بل أدت إلى مضامين لها دلالتها وأقل ما فيها أنها أظهرت وجود الأمواج الكهرطيسية ، هذا عدا أن هذه الأمواج تنتشر بسرعة الضوء وتتمتع بجميع خواص الضوء الفيزيائية الأخرى الأكثر أهمية . وهكذا كان لامناص في الحقيقة من أن تكون هذه الأمواج نفسها التي ساعدت على تفسير جميع الظواهر التي نعرفها عن الضوء . ذلك أنه عندما لوحظ أن تفاصيل نظريات فرينيل الشهيرة المعقدة موجودة دون استثناء في المعادلات الكهرطيسية الجديدة ، عندئذ تبين أن مطابقة الأمواج الكهرطيسية مع الضوء

أمر لامفر منه ، كما أن المطابقة بين الأثيرين اللذين كان العلماء قد بذلوا قصارى جهدهم للتمييز بينهما ، أصبحت أمراً ممكناً ايضاً .

ولكن لايمكن التسليم بالنظرية إلا بعد الحصول في المخبر على أمواج مكسويل الكهرطيسية التي يفترض وجودها نظرياً . وهذا ما بدا صعباً جداً ، لأن الصعوبة لم تكن في الحصول على هذه الأمواج بل في إثبات أنه قد تم الحصول عليها فعلاً . وهكذا كانت السنوات تمضي دون أن يتم الكشف عن أمواج من هذا القبيل . فبدأ الشك يتسرب إلى نفوس الفيزيائيين في صلاحية أفكار مكسويل ، وكان مما يزيد في ذلك أنها بنيت على مقارنات وتشبيهات يغلب عليها الغموض . فنظرية مكسويل ، مهما بدت جذابة على الورق ، إلا أن من الممكن النظر إليها بحق على أنها مجرد فرضية هامة ماتزال فيها مواضع معرضة للشك ، إلا اللهم ، إذا أمكن الكشف فعلاً عن الأمواج الكهرطيسية في المخبر وتمت دراسة خواصها .

وهكذا لم يعش مكسويل ، بكل أسف ، مدة تكفي لأن يشاهد تحقيق نظريته . فبعد موته بسبع سنوات فحسب اكتشف هيرتز لأول مرة الأمواج الكهرطيسية التي تنبأ بها .

كانت الشرارة الضعيفة التي تجتاز الفتحة بين طرفي السوار الذي وضعه هيرتز على الطاولة ، تشير فحسب إلى أن هناك اضطرابات كهرطيسية تجتاز المخبر ، أما أن هذه الاضطرابات هي أمواج فهذا ما كان إثباته يحتاج إلى دراسة متأنية يقظة . لذلك أخذ هيرتز يدرس سلوك هذه الشرارات عند تغيير موضع سواره وملاحظة تغير شدة الشرارات . ولكن ضعف هذه الأخيرة الشديد ، جعل المحاولة عسيرة جداً . ومع ذلك فقد برهن هيرتز بهذه الوسائل البدائية جداً أن هذه الاضطرابات لها قدرة على الانعكاس والانكسار ، وتتمتع بمزايا أخرى من مزايا الضوء ، مما أزال كل الشكوك التي كانت لاتزال عالقة بشأن سلوكها الذي تبين أنه هو ما تنبأ به مكسويل تماماً ومن طينته ، إذ تبين أنها مطابقة كل المطابقة للأمواج الضوئية . وهكذا نرى أن أهمية تجارب هيرتز أو مدلولها الحقيقي لايتجلى في اختراع الراديو تلغراف ، بل في البرهان الأكيد الذي قدمته على صحة نظرية مكسويل .

ولم تكن هذه بالنظرية الهينة ، حتى لقد نتساءل كيف تجرأ مكسويل ، وبكل هذا الحزم ، أن يعارض كل معطيات حواسنا وأن يصر على أن الأمواج الراديوكهربية والضوء هما من طبيعة واحدة ، وأن ما بينهما من فرق لايعدو كونه فرقاً في تواتر الموجات أو وتيرة الخفقان أو عدد الهزات التي يصدرانها في الثانية . ففي السابق كانت هذه الميزة ، أي عدد الاهتزازات في الثانية ، هي الأصل في التفريق بين الألوان ، سواء في نظرية الضوء التموجية أم في نظرية نيوتن عن الجسيمات المهتزة . أما الآن فقد لزم توسيع صلاحية هذا النوع من التمييز على أشكال أخرى من الإشعاع . فمثلاً عندما يكون تواتر الأمواج المضيئة ضعيفاً ، تكون هذه الأمواج في فئة الضوء الأحمر . ثم على قدر ما تشتد وتزداد وتيرة الاهتزازات ، يتحول اللون إلى البرتقالي ثم إلى الأصفر ، وهكذا حتى يمر بكل ألوان قوس قزح وينتهي بالبنفسجي آخر ألوان الطيف المرئي . ولكن ما الذي يجعلها تتوقف عند حدود الألوان المرئية ؟ لكي نعطي صورة كاملة عن الوضع ، دعونا نستبق الحوادث . بالفعل ، إذا مضينا إلى أعلى فأعلى في سلم التواترات ، نصل إلى الضوء غير المرئي الذي ندعوه فوق البنفسجي ، ثم إلى الأشعة السينية ، وأخيراً إلى أشعة غما التي يصدرها الراديوم والمواد الأخرى ذات النشاط الإشعاعي (هذه الأشعة توجد أيضاً في الأشعة الكونية) . وإذا هبطنا في سلم التواترات إلى ما دون الضوء الأحمر ، نجد الأشعة الحرارية ثم أمواج مكسويل وهيرتز الراديوكهربية . وقد أظهرت كل هذه الأنواع المختلفة من الإشعاعات أنها من طبيعة واحدة وأن تواتر الاهتزاز هو وحده الذي يميز أحدها من الآخر . أي بالإجمال لافرق بينها إلا في اللون . وهي جميعاً ترتبط من حيث خواصها ارتباطاً وثيقاً بالظواهر الكهربائية والمغناطيسية وبميكانيك نيوتن . وهكذا وحدت نظرية مكسويل بين ظواهر مختلفة . ولكن ، على الرغم من روعة هذا التوحيد ، إلا أنه لم يعطِ سوى فكرة ضعيفة عن أهمية النظرية ومكانتها .

وقد كان هذا التصور الشامل الفخم تتويجاً رائعاً لمنجزات ديناميك نيوتن الرائع ، حتى ليحق للعلم أن يشعر بالفخار والزهو . ألم يجعل حركة العالم كله خاضعة لقوانين رياضية محددة تماماً ؟ ألم يثبت أن هذا العالم قد كتب عليه أن يتابع سيره المرسوم إلى الأبد ، وأن حركات مكوناته محددة بكل دقة وفقاً لمخططات رياضية

رشيقة رائعة ؟ ألم يبرهن كذلك على أن كل جسيم مادي وكل موجة شعاع صغيرة وكل ارتعاشة توتر أثيري يجب أن تنفذ القوانين العليَّة التي كشف عنها الإنسان برياضياته ، حتى آخر حرف فيها ، بل وبأعظم قدر من الدقة ؟ فللعلم إذاً أن يهنأ بهذه النتيجة ، فها هو الكون الجبار تحكمه معادلات يعرفها الإنسان . كما أن كل حركة من حركاته أصبحت محسوبة متوقعة من الوجهة النظرية ، وكل فعل من أفعاله أو حدث من أحداثه يمر بثبات من السبب إلى النتيجة وفق قوانين مدروسة . حقاً أنه ما زالت توجد بعض المصاعب العملية التي لم يتمكنوا من تخطيها ، والتي كانت تمنع عملية التنبؤ من أن تكون بالغة الدقة . ولكن كان يفترض من الوجهة النظرية أنه لو أمكن القيام بالملاحظات التي لاحصر لها ، وتم تنفيذ الحسابات المطلوبة كلها ، لأمكن الكشف عن مصير الكون الغامض حتى آخر تفاصيله . لقد مُهِّدت أرض العلم تماماً ، وما تبقى ، لايتعدى السير قدماً في تفصيل ما سبق أن عرفناه أصلاً . على أن هناك أناساً وهبوا قدرة أشبه بقدرة الأنبياء على الإلهام ، ويستطيعون كشف حجب الغيب ، حتى لقد تبينوا اقتراب العاصفة من بعيد ، إلا أن تحذيراتهم لم تثر قلق الرأي العام ، فالفيزياء انتهى أمرها وأصبحت مسألة محلولة ، حتى لقد راحوا ينظرون إليها على أنها نظام مكتمل ورشيق ، واكتفى الفيزيائي فيها بزرع حديقته وجني ثماره من دون أن يدري أنه سيقع عما قريب في مجاهل غابة كثيفة ، لأن بلانك وأتباعه كانوا على وشك أن يتذوقوا مرارة الشجرة التي بها تحيا المعرفة .

كانت نظرية الجسيمات في الضوء قد فقدت قبل مكسويل بزمن طويل كل أسباب وجودها . والآن بعد أن تلقت النظرية التموجية دفقة حياة جديدة ، وتبين أن لها معيناً غير متوقع في الكهرطيسية ، أصبح من المحتم على النظرية أن تموت .

على أن هيرتز لاحظ عام ١٨٨٧ ، وحتى خلال التجارب التي كانت تثبت وجود أمواج مكسويل ، أن هناك ظاهرة غريبة قد لايكون لها معنى ، حتى ليبدو أنها تكاد تكون غير جديرة بالشرح والتعليق ، نظراً لتفاهتها . فعندما ينعكس الضوء الصادر عن الشرارات المتوثبة من الجهاز المولد ، على طرفي الكاشف المفتوحين ، كان تيار الشرارات الضعيف عند فتحة السوار يقفز بأسرع مما يجب بقليل .

٢ ــ الإحساس بوجود الكم

في عام ١٨٨٧ ، كان هيرتز قد لاحظ تلك الحقيقة الغريبة ، وهي أن سقوط الضوء فوق البنفسجي على جهازه ، كان يجعل الشرارات تنطلق بيسر أكثر قليلاً من المعتاد . إلا أنه لم يكن في وضع يؤهله لأن يفهم أن ما كان يجري تحت بصره ما هو إلا حادثة تعد اليوم من أكثر الأدلة التي نملكها وضوحاً على وجود الكم . كما أن العالم لم يكن مهيأً لتلقي هذه الهبة الثمينة . لذلك كان لابد للكم من أن ينتظر انتهاء القرن لكي يصبح معروفاً . ولكنه حتى عندما عُرف ، لم تكن هذه هي الطريقة التي عُرف بها .

والآن ، نحن نعرف مبلغ حضور الكم في كل ما هو موجود . بل لقد تملك على الفيزيائيين تفكيرهم . وهو يتردد في كل معادلة من معادلاتهم ، ويوحي لهم بتجاربهم ، ويقودهم إلى مناقشات طويلة ــ وعقيمة في أكثر الأحيان ــ مع الفلاسفة ورجال الدين حول الإله وحرية الاختيار . وقد أحدث اكتشافه ثورة في بعض جوانب الكيمياء النظرية ، والكيمياء (كما نعلم) لايفصلها عن البيولوجية ــ أي علم الحياة ذاتها ــ سوى خطوة واحدة . إلا أن هذا الكم ، الحاضر في كل مكان ، لم يألُ جهداً بالفعل في إملاء حقيقة وجوده بكل جلاء . وكان العلماء قد بدؤوا باستقباله مترددين حائرين ، لأنه ظهر في مجال لم يكن له فيه مثل تلك الدلالة (التي نشاهدها اليوم في ظواهر أخرى) : لذلك كان التسليم بوجوده أقرب لأن يكون مجرد تخمين موفق .

والحقيقة أن الكم ، لم يحتل مكانه رسمياً في الفيزياء إلا بعد فضيحة سميت « بالكارثة فوق البنفسجية » ، وهي كما نرى ، تسمية كان الأجدر أن يطلقها

الفيزيائيون على قصة من قصص الخيال العلمي ، لا أن يسيؤوا استعمالها بإطلاقها على كارثة نظرية بحتة .

وإليكم حقيقة الكارثة : إذا حسبنا كيف يجب ان يطلق جسم ساخن جداً إشعاعه ، فسنجد أن الدستور الذي نحصل عليه يقتضي أن تكون طاقة الجسم كلها قد تركت هذا الجسم منذ زمن طويل ، بانطلاقها على شكل إشعاع فوق بنفسجي مذهل .

ولكن عدم وجود ظاهرة كهذه ، هو واحد من الأسباب التي تجعلنا نستنتج أن هذا الدستور غير صحيح . ومع ذلك لم يكن هذا الدستور خطأً كله . إذ إن نتائجه تصبح صالحة في حالة ضوء تواتره منخفض . ولكن نتائجه تصبح سخيفة غير معقولة عند التواترات المرتفعة حيث ينذر بكارثة خيالية .

على أنه أمكن التصدي لمسألة الجسم المتوهج (العالي التواتر) بطريقة أخرى غير السابقة ، وقد أدت إلى دستور رياضي مختلف . وهذا الدستور أزاح بكل نجاح كارثة فوق البنفسجي واتفق تماماًمع التجربة التي تتناول الضوء العالي التواتر (وبذلك أصبح هناك دستور لكل حالة) .

ولكن هل حُلَّت المسألة بهذا الشكل ؟ من المؤكد أن لا . فبينما نرى الدستور الأول صالحاً للتواترات المنخفضة ، نجد أنه غير صالح للتواترات العالية . وكذلك فإن الدستور الثاني ، الذي لم نجد ما هو أصلح منه للتواترات العالية ، لايصلح للتواترات المنخفضة . فلدينا دستوران كل منهما يعبر بنجاح عن نصف الواقع الراهن ، أو نصف الحقيقة .

وهذا ، باختصار ، هو الوضع عندما بدأ ماكس بلانك ، أستاذ الفيزياء في جامعة برلين ، أبحاثه الحاسمة .

لقد اكتفى بلانك في بادئ الأمر ، بتسلية نفسه « بأحجية » بسيطة . إذ راح يحاول النظر في هذين الدستورين الناقصين : ترى ماذا لو حرفهما بطرق مختلفة ؟ هل سيؤديان إلى دستور موحد ؟ .. بالفعل ، ما هي إلا بضع محاولات حتى

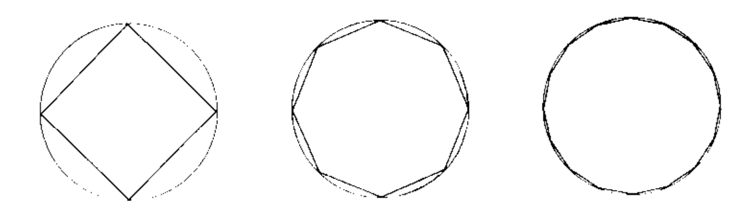
رأيناه يكتشف في عام ١٩٠٠ دستوراً رياضياً واحداً يشبه الدستور الأول تماماً في حالة التوترات المنخفضة ، ويشبه الدستور الثاني في حالة التواترات العالية . ولم يكن هذا الحل مبنياً على حجة أساسية ، وإنما كان مجرد حيلة رياضية بارعة ، أو لنقل إنه كان أشبه بعملية تركيب قطع مبعثرة يُجمع بعضها مع بعض للوصول عن طريق المحاولة والخطأ إلى الشكل المناسب ، أي كمن يحاول التوفيق بين سترة من طقم ، مع سروال من طقم آخر . ولكن بلانك وفق في النهاية بالوصول إلى نتيجة كان واثقاً كل الثقة من صحتها ، ونجح في الجمع بين السترة والسروال ، حتى أن الطقم الذي حصل عليه ، كان ذا قيمة أعلى بكثير من القطعتين اللتين كان يتألف منهما .

لقد كان هذا الدستور الجديد الذي دعي بدستور الإشعاع الحراري ، متفقاً كل الاتفاق مع التجربة ، ولكن بلانك أصبح الآن في وضع التلميذ الذي خابت ظنونه . لأنه بعد أن تمكن باتباع شتى الحيل من إلقاء نظرة على الجواب النهائي لوظيفته اليومية ، وجد أنها مازالت صعبة ، إذ كان لابد من إظهار الأسس النظرية التي تبنى عليها هذه المعادلة . ولم يكن بلانك عاجزاً عن التصدي لهذه المهمة الجديدة ، بل كان باستطاعته تخيل المبرر النظري للدستور الذي ركبه بنجاح . فأبحاثه الطويلة غير المثمرة ، كانت قد أقنعته بأن الخلاص الوحيد من مثل هذا الوضع هو اتخاذ القرار الجذري الحاسم . وهكذا صب بلانك (بعد أن تسلح بهذه العقيدة الجوهرية) كل جهوده على حل هذه المسألة ، وأشبعها درساً وإمعاناً . ولم تمضِ بالفعل سوى أسابيع قليلة ، حتى كان الحل جاهزاً بين يديه . ولكنه لم يكن للأسف حلاً يستقيم مع العرف ، الأمر الذي حجب عنه جائزة نوبيل طيلة سبعة عشر عاماً مقفرة من الأحداث .

وقد ينتظر القارئ منا إعطاء وصف مضبوط لحجج بلانك ، إلا أن هذا الأمر سيجرنا بعيداً في تيار الرياضيات المجردة . ولكننا نستطيع أن نقدم بوسائل الشرح المبسط شيئاً عن روح هذا العمل . وهو عرض لانزعم أنه أمين لحجج بلانك ، إلا أنه تحوير فني يراعي السمة العامة وطريقة التفكير ، وينهج منهجاً أقرب إلى سير الحكم والأمثال الرمزية . ولاضرر من أن تروى القصة بهذا الشكل ، وكأنها هي القصة الحقيقية عينها .

ففي الرياضيات ، هناك طريقة ابتدعها اليونانيون : يمكن أن نتخلص بها من متصل ينساب انحناؤه بنعومة تجعل معالجته صعبة في الرياضيات ، وذلك بأن نستبدل به متتالية من القفزات المتقطعة التي يسهل معالجتها رياضياً . فمثلاً لو حاولنا حساب (وليس قياس) طول محيط دائرة قطرها سنتيمتر واحد ، لبدا لنا كم يجد الرياضي من صعوبة في حساب هذا المحيط المتصل المنساب . لذلك نفعل كما يفعل القط الذي يزحف نحو ضحيته وهو ينظر إلى جهة أخرى ، فنحسب في بادئ الأمر شيئاً نثق به ويشكل بالنسبة لنا أرضاً ذهنية صلبة ، ثم نمضي منها لحساب المحيط ، وبعد أن نصل إلى وضع نثق فيه بأننا أصبحنا مهيمنين على مسألتنا المراوغة . ننقض عليها دون أن يخالجنا أدنى خوف من الفشل في مسعانا .

فلحساب محيط الدائرة ، نقسمه إلى أربعة أقسام متساوية ، ثم ثمانية ، ثم ستة عشر ، إلخ .. ثم نصل بين النقط القاسمة بحيث تتشكل لدينا مضلعات محدبة : مربع ، مثمن ، إلخ ..



الشكل (١ ــ ١)

ويمكن طبعاً حساب المحيط الكلي لأي واحد من هذه المضلعات . فإذا رسمنا أضلاعاً أصغر فأصغر ، فإن المحيط الكلي يتقارب شيئاً فشيئاً من محيط الدائرة ، فمثلاً محيط المضلع ذي الستة عشر ضلعاً هو أقرب إلى محيط الدائرة من محيط المربع . ولما كان باستطاعة الرياضي أن يحسب محيط مضلع ما ، لذلك ما عليه بعد

أن يعطي دستور الحالة العامة لمحيط المضلع ، إلا أن يصقل الزوايا ليجعلها أقرب فأقرب إلى الانحناء وذلك بأن ينهي عدد الأضلاع في دستوره إلى اللانهاية . وهكذا نرى أن المتصل الذي تصعب معالجته مباشرة ، لايمكن حسابه بهذه الطريقة إلا بعد إعطاء الدستور العام الذي يساعد على معالجته . ففي مثالنا السابق ، إذا انتقلنا إلى اللانهاية ، نجد أن محيط الدائرة التي قطرها واحدة الطول هو العدد الذي يشار إليه بالرمز اليوناني « باي » (π) الذي سنصادفه باستمرار في نظرية الكم . إن قيمة π تساوي تقريباً ٣,١٤ ، ولكن هذا التقريب لايفارقها ، لأننا لو حاولنا كتابة قيمتها الصحيحة لقاومت محاولتنا بصلابة وعناد ، ولظلت أرقامها تزداد تارة وتنقص أخرى ، دون تكرار أو نظام واضح ، إذ نجد أن :

$$\pi = 3{,}14\ 15\ 9265\ 3589\ 7932\ 3846\ 2643\ 3832\ 7950\ldots$$

والآن ، لنعد إلى بلانك . كان بلانك قد برهن (لأمور تتعلق بأبحاثه الخاصة ، وحتى قبل عام ١٩٠٠) أن أي قطعة من المادة يمكن أن تمثل بالعديد من الجسيمات التي تهتز بشكل إيقاعي . منها ما يهتز بسرعة ومنها ما يهتز ببطء ، بحيث نعثر بينها على تواترات الاهتزاز المختلفة كلها . وكانت مهمة هذه الجسيمات الوحيدة ، التي سماها بلانك **الهزازات** ، هي أن تمتص الحرارة والطاقة الضوئية بزيادة قوة اهتزازها (أي زيادة سعة اهتزازها) ، أو أن تطلق طاقتها باستسلامها للتخامد . وهكذا كانت أشبه بمراجيح الأطفال التي تحلق بعد كل دفعة جديدة إلى أعلى راسمة أقواساً أكبر ، ومحافظة بالتالي على الطاقة التي أخذتها كما تحافظ الاسفنجة على الماء .

وهذا أمر معروف ، لأن الأجسام المادية كلها تمتص الطاقة عندما تسخن . ولكن بلانك استطاع باستعمال نموذجه المبسط (أي اعتبار الجسم مجموعة من الهزازات) أن يحسب كيف يمكن للمادة أن تمتص الحرارة أو تبثها عند كل درجة حرارة مفروضة . ولما كانت دراسته تتناول تغير كميات مستمرة للطاقة الممتصة أو المبثوثة ، لذلك فقد استعمل الحيلة التي مرّ ذكرها ، وهي طريقة حساب محيط الدائرة ، أي أنه أخذ تغيرات متقطعة يستطيع حسابها وجمعها بدلاً من تغيرات مستمرة . ثم بعد أن أنهى حسابه تأكد ، كما كان يتوقع ، أنه إذا ضيق فجوات الانقطاعات الحادة وأزالها مرة

واحدة ، ثم انتهى إلى الاستمرار وفقاً للتقنيات المألوفة ، فإنه سيتورط مرة أخرى بمصيبة مافوق البنفسجي . وهنا استفاد بلانك من الميزة التي لاتقدر بثمن ، وهي معرفته مسبقاً للحل النهائي . فبلانك كان مستعداً منذ البدء لأن يغض نظره عن أي انحراف عن المألوف طالما أن فيه فرصة معقولة لإعطاء الحل . وهذا ماحدث فعلاً ، فقد تراءت له من حساباته الفرصة التي يسعى إليها . وكانت فرصة رائعة فعلاً ، ولكنها رهيبة في الوقت نفسه . لأن خروجها عن القواعد المألوفة ، كان أبعد من أن يتغاضى عنه أو يغفله . ولكنه ما أن وطد نفسه على قطع صلاته مع أكثر التقاليد قدسية في الفيزياء النظرية ، وذلك برفضه تسوية (أو تنعيم) قفزات الطاقة (أو قبوله بمبدأ الانقطاع في الطاقة) ، حتى تبين له كيف يمكن الحصول على الإجابة الصحيحة التي كان يعرف أنها هي التي تتفق مع التجربة .

ولكن فكرة كهذه كانت نزوة خارقة . لأنها تعني التسليم بأن اهتزازات الأرجوحة (الجسيم الهزاز) ، يمكن أن تبلغ سعتها متراً ومترين وثلاثة أمتار وأربعة وهكذا ، ولكنها لايمكن أن تصبح متراً وربع المتر ، أو أي قيمة وسطى بين هذه القيم . ولاشك أن مثل هذه الشروط ، يمكن لكل إنسان ، وحتى الطفل ، أن يقدر ما فيها من غرابة وابتعاد عن المألوف . ولكنها مع ذلك هي التي تؤدي إلى الحل الصحيح .

ولو أن بلانك سوّى قفزات الطاقة بحيث تصبح تغيراتها مستمرة ممهدة ، لأخلت التواترات العالية بموازين الطاقة (أو بالأحرى لتجمعت كلها هناك عند التواترات العالية) . ولسببت فضيحتها المعروفة[1] . فلابد إذاً من لجم هذه التواترات العالية بطريقة أو بأخرى . ولم يكن الاستغناء عن تسوية قفزات الطاقة (أي تمهيدها وتنعيمها) بحد ذاته حلاً للمشكلة ، ولكنه كان المخرج الوحيد لممارسة الرقابة على التواترات العالية ، الأمر الذي لم يكن مباحاً في شريعة القوانين الكلاسيكية . لأن بلانك ، إذا قرر أن الطاقة لابد أن تصدر على شكل « حزم » محددة ، فإنه سيستطيع أن يحقق بذلك خطوة إلى الأمام ، وهي أن يبطل تمرد التواترات العالية بجعلها « تشكل » حزماً أضخم بكثير من الحزم التي تشكلها التواترات المنخفضة . وبهذا الشكل يصبح باستطاعة

(١) أي فضيحة فوق البنفسجي التي مر ذكرها . (المترجم)

التواترات المنخفضة أن تجمع حزمها الصغيرة بيسر ، بينما ستجد التواترات العالية صعوبة في تجميع حزمها الضخمة . وكان بلانك قد استخدم تعبيراً ملائماً لذلك سبق أن استعمل في ظروف أخرى ، وحتى في كتب الفيزياء ، إذ دعى هذه الكمية المحدودة من الطاقة ، أو بالأحرى هذه الحصة (أو الحزمة) « كم » الطاقة quantum d'énergie .

ولكي يجعل بلانك حله النهائي صحيحاً ، وجد أن من الضروري وضع قاعدة ثابتة لتحديد « كم » الطاقة بالنسبة لكل تواتر خاص . والغريب أنها كانت قاعدة بسيطة من الوجهة الرياضية ، وإن لم تكن كذلك من الوجهة الفيزيائية . إذ أدخل كمية خاصة رمز لها بالحرف h ، وأعلن ذلك الدستور الشهير الذي كان له في الأوساط العلمية دوي القنبلة الذرية :

كم الطاقة = h مرة من التواتر

ومنذ ذلك الحين أُطلق على الكمية الأساسية h التي أدخلها بلانك اسم « ثابت بلانك » . فأصبحت شارة الفخار والمجد للفيزياء الجديدة ، ورمز تحديها للنظام القديم . وغدت مصدر ازدهار لأحداث خطيرة ، هذا على الرغم من أن قيمتها لم تكن بهذا القدر الذي يحسب له حساب ، إذ كانت تساوي :

0,000 000 000 000 000 000 000 000 006 6.

(مقدراً بنظام الوحدات الأساسي الذي يضم السنتيمتر والغرام والثانية ، أي الجملة السغثية) .

ومن الواضح أن صغر قيمة h إلى هذا الحد يعني أن قفزات الطاقة صغيرة إلى حد بعيد . غير أن التصميم على عدم الاستغناء عنها كلياً ، كان يعني أيضاً لعبة شيطانية تفوح منها رائحة النار والكبريت ، وتعرض الروح الخالدة لخطر رهيب . فقضية حزم الطاقة هذه ، كانت هرطقة لاتغتفر ، وتسبب الرعب لأشجع الفيزيائيين[1] . لذلك لم يشعر بلانك بالراحة أبداً . وكان مما يزيد من بشاعة موقفه ، معرفته بأنه إذا ما قرر

---

(١) بالفعل ، فقد أبدى بوانكاريه قبل إعلان هذا الدستور بسنوات قليلة خوفه من الحديث عن الانقطاع . لأن الجميع كانوا يتصورون أن دساتير الفيزياء هي قوانين مستمرة . ومع ذلك فقد برهن هو نفسه بأن دستور بلانك المتفق مع التجربة لايمكن الوصول إليه بأي طريقة أخرى غير طريقة الانقطاعات . (المترجم)

الاستغناء عنها فإن عليه أن يناقض في حساباته فرضه الخاص المتعلق بقفزات الطاقة . فلا عجب إذاً ، إذا رأيناه يكافح يائساً خلال سنوات لكي يعدل نظريته ويستغني نهائياً عن قفزات الطاقة دون أن يضحي بالنتيجة النهائية .

ولكن ما الفائدة ؟ فقفزات الطاقة موجودة شاء أم أبى ، وامتصاص الطاقة لايكون إلا على شكل « حزم » ، أما كموم الطاقة فهي إحدى الحقائق الأساسية في الطبيعة ، ولماكس بلانك مجد خالد باكتشافها .

٣ ــ بكموم الضوء : تتضح الأمور

عاشت فكرة بلانك عيشة الكفاف مدة أربع سنوات وهي تكاد تكون منسية من مكتشفها ، وفجأة ، أعلن موظف صغير في مكتب براءات الاختراع السويسري في بيرن عن كشف جريء صارخ مالبث أن بعث الحياة من جديد في اكتشاف بلانك الذابل ، وجعله يجتاز بكل قوة وثقة الطريق التي أدت في النتيجة إلى لقائه المرسوم مع بوهر عام ١٩١٣ .

وكان هذا الكاتب نفسه قد قدم قبل ذلك بوقت قصير شرحاً نظرياً وافياً للحركة البراونية . ثم بعد مضي أربعة أشهر تقريباً على بعثه لاكتشاف بلانك ، نشر نظرية جديدة تتعلق بإلكتروديناميك الأجسام المتحركة التي تعرف اليوم باسم نظرية النسبية الخاصة . وكانت أفكار هذا الموظف ، الذي يدعى أينشتين ، أصيلة مذهلة حول هذا الموضوع ، حتى أنها لم تضطره للانتظار أكثر من أربع سنوات فحسب ، لينقل من هذا المرفأ المؤقت « مكتب البراءات » ، ويلتحق بالكلية الجامعية في زوريخ .

لقد دفع أينشتين فكرة بلانك إلى وضع ثوري أشد حتى مما كان بلانك نفسه يجرؤ على تخيله . فهذا الأخير كان يقول : إن الطاقة لايمكن أن تختزن في المادة إلا على شكل حزم ، أما خارج المادة ، حيث تظهر على شكل إشعاع ، فإنها تظل راضخة للقوانين المستمرة التي وجدها مكسويل . ولكن أينشتين ، برهن أن هاتين الفكرتين لاتتفقان أبداً (الانقطاع داخل المادة ، والاستمرار خارجها) ، وأن الانسجام لن يتحقق إلا إذا كان الإشعاع نفسه أيضاً مؤلفاً من حزم .

ولكن أي نتائج بالتحديد ستترتب على هذه الافتراضات ؟ ألن تكون

قبل كل شيء وبالاً على بلانك ؟ ألن تعني أن محدث النعمة هذا ، أي بلانك ، قد تجرأ على معارضة شخصية كشخصية مكسويل ؟ لذلك كان على الشاب أينشتين أن يتسلح بقدر كبير من الجرأة ونفاذ البصيرة لكي يستطيع التأكيد بأن العكس هو الصحيح وأن مكسويل هو الذي كان يناقض بلانك .

فبينما كانت تقول نظرية بلانك إن المادة وحدها هي التي تمتص الطاقة وترسلها على شكل حزم ، أصبح أينشتين يؤكد الآن ، أن كل كم من كموم الطاقة ، حتى بعد صدوره عن المادة ، لايتصرف فحسب على شكل موجة « يرضي بها » خاطر مكسويل ، بل لابد أنه يتصرف أيضاً ، وإلى حد ما ، على شكل جسيم الضوء الذي سندعوه من الآن **فوتوناً** .

لقد كانت هذه دعوى ثورية حقاً ، ولكن أينشتين كان يملك في يده كل أوراق فوزها ولاسيما ذلك المفعول المثير الذي لاحظه هيرتز قبل ذلك بما يقرب من عشرين عاماً .

ومنذ ذلك الحين بدأنا نتعلم الكثير عن هذا المفعول . ففي انجلترة اكتشف ج . ج . تومسون الإلكترون ، وفي ألمانية كشف لينار Lenard ، تلميذ هيرتز ، الستار عن آلية مفعول هيرتز ، وذلك بأن برهن أن للضوء فوق البنفسجي خاصة تبخير الإلكترونات عن سطح معدني ، مثلما أن أشعة الشمس ، إلى حد ما ، تبخر ماء البحر . وهذه الظاهرة (ظاهرة تبخير الإلكترونات) التي تدعى اليوم المفعول الكهرضوئي ، هي التي ساعدت على ظهور تيار الشرارات بين طرفي السوار في تجربة هيرتز .

لقد أعطى أينشتين إذاً نظرية عن المفعول الكهرضوئي جعلت فكرته الجديدة عن كموم الضوء تسجل انتصاراً باهراً . وكانت هذه النظرية ، بخلاف نظريته النسبية ، سهلة يسيرة على الأفهام . فهي كما سنرى تفسر بوضوح كل الظواهر العديدة غير المألوفة التي تلاحظ في هذا المفعول . وحين نفكر بأن المفعول الكهرضوئي كان هو الأساس لكثير من الابتكارات : مثل الخلية الضوئية ، والسينما الناطقة ، والتلفزيون ، فقد يدهشنا تنوع النتائج الثانوية التي انبثقت عن أبحاث هرتز الأكاديمية حول التعديلات

الطفيفة التي أدخلها مكسويل على المعادلات الكهرطيسية[١] .

والحقيقة ، أن أينشتين ، طور اعتماداً على عدم استمرار كموم بلانك ، فكرة مدهشة عن مبدأ ذري شامل في الطاقة عامة . ولكي نظهر الفارق بين بلانك ومكسويل وأينشتين ، دعونا نتخيل اسفنجة داخل حوض مملوء بالماء . إننا نستطيع تشبيه الاسفنجة بكتلة مادة مشعة ، والماء بالأثير . فبحسب مكسويل ، إذا عصرنا الاسفنجة ، فإن الأمواج تتولد من الماء المطرود منها ، وتنتشر على سطح الحوض . أما اسفنجة بلانك ، فهي اسفنجة من نوع نادر ، إنها أشبه بعنقود عنب منها بالاسفنجة : وهي مؤلفة من آلاف البالونات الصغيرة المنتفخة المملوءة بالماء ، والمتنوعة الأحجام . فإذا عصرنا هذه الاسفنجة ، انفجرت البالونات الواحد تلو الآخر ، وتحرر من كل منها فجأة الماء الذي كان بداخله بانفجار واحد صغير — يعطي حزمة ماء — ويحدث في الحوض أمواجاً مشابهة لأمواج مكسويل . أما أينشتين فهو يضع الاسفنجة خارج الحوض ، الذي لايحتاجه إلا لاغتراف الماء ، فعندما يعصر اسفنجته بتأن ، يجري الماء منها على شكل قطرات متلألئة كالمطر . فعدم استمرارية القطرات ، لاتنشأ فحسب من تركيب الاسفنجة الداخلي ، بل هي كذلك ملازمة لطبيعة الماء لأن هذا الأخير ، يظل على شكل قطرات حتى بعد خروجه من الاسفنجة .

كان تصور أينشتين هذا غريباً جداً . إنه يعني العودة إلى نظرية نيوتن الجسيمية القديمة . حتى أن نبضات نيوتن ما زالت تلعب فيه دوراً أساسياً . لأن سرعة هذه النبضات ، التي كانت هي أيضاً تواتر الضوء في النظرية الجسيمية ، هي التي كانت تلعب إذن دوراً مزدوجاً . إذ ليس مفترضاً فيها أن تحدد لون الفوتون فحسب ، بل تحدد أيضاً ، بحسب قاعدة بلانك ، طاقته .

ولكن من ياترى يقبل التسليم الآن بنظرية خيالية كهذه ؟ ألم يمضِ على النظرية الجسيمية ، ولأسباب وجيهة ، مدة مئة عام وهي مطوية في ظلام النسيان ؟ ثم إن النظرية التموجية ، ألم تفرض نفسها فرضاً بعد أبحاث وتجارب جرت في

---

(١) طفيفة حين تكتب ، ولكن وقعها كبير بنتائجها . (ملاحظة المترجم إلى الفرنسية)

اتجاهين مستقلين (البصريات ، والكهرطيسية) ؟ فكيف يمكن للنظرية الجسيمية أن تأمل بسلب النظرية التموجية انتصاراتها التي لامراء فيها ؟ ثم ، قبل كل شيء ، من أين أتانا هذا الموظف الصغير في براءات الاختراع (أينشتين) الذي لم يكن أستاذاً في الجامعة ؟ بل إن العودة ، أو حتى كل عودة ، إلى عقيدة جسيمية ، تعني التسليم بأن نظرية الظواهر الكهرطيسية كلها باطلة من أساسها حتى لو بلغت أقصى آيات الروعة والرشاقة وتأكدت كل تفاصيلها . إلا أن أينشتين اقترح القيام بهذه الخطوة دون مواربة أو خوف ، بل لقد اقترحها بشكلها المحدد الكمي واعتماداً على تفكير ناضج وحجج دامغة .

ترى ، هل كانت تلك العودة رهيبة فعلاً ؟ حقاً إن النظرية التموجية كانت قد انبثقت من تياري بحث مختلفين مستقلين[١] . ولكن أينشتين مضى بهدوء في إظهار التعادل بين النظريتين في كل مجال . هذا على الرغم من أن التجارب التي عملت على إثبات الطبيعة الجسيمية ، كانت قد فشلت كلها منذ أكثر من قرن . وهذا صحيح ، ولكن ألم تكن الظواهر المماثلة للكارثة فوق البنفسجية كافية لإظهار أن النظرية التموجية هي نفسها عرضة أيضاً للمضايقات ؟ فالمعركة إذاً ، وحتى منذ البدء ، لم تكن على هذا القدر من عدم التكافؤ .

كان بلانك أول البادئين في الصراع ، ثم بعد حين ، راح أينشتين يعكر صفو الحياة على النظرية التموجية . فقد كان ، على الرغم من أعماله الأخرى (كالنظرية النسبية) ، يجد الوقت من حين لآخر لكي يلتفت للمعركة دون كلل ، مبرهناً أنه مقاتل عنيد ، يجمع بحججه أعداداً متزايدة من المؤيدين ، الذين لم يألوا جهداً أيضاً في إبراز حقائق جديدة وهامة لدعم هذا التصور الجديد للضوء . ولم يلجؤوا في سبيل ذلك إلى براهين تقنية صعبة حساسة ، بل قدموا تفاسير مباشرة وبسيطة لحقائق تجريبية سبق أن عانت منها النظرية التموجية . وقد عملوا بتأنٍ وصمت ، وكان أبرز تفاسيرهم ذلك الذي قدمه أينشتين للمفعول الكهرضوئي .

كان المفعول الكهرضوئي يبدو للوهلة الأولى أشبه بالمعجزة . مع أن تأثير

---

(١) أي الإثباتات النظرية والتجارب العلمية . (المترجم)

الضـوء في الإلكـترونات أمر طبيعي ، حتى من وجهـة النظر المكسـويلية . ذلك لأن مكسـويـل كان قد برهن أن الضـوء من طبيعـة كهرطيسيـة ، فلابد أن تؤثر الموجة الكهرطيسية في جسيم كالإلكترون الذي هو اساساً جسيم كهربائي . فوجود المفعول الكهرضوئي نفسه ليس فيه مايثير الدهشة كثيراً ، بل ليس هو ما عرّض نظرية الأمواج للهلاك . ولكن الدهشـة تملكت الباحثين حينما قيست سرعة الإلكترونات المنتزعة من المعدن بكل دقة . إذ كان المفروض ، إذا أردنا الأخذ بنظرية مكسويل ، أن تزداد سرعة الإلكـترونات عندما تزداد كمية الضوء . ولكن التجارب أعطت نتائج مغايرة لذلك . فالسرعة ظلت على حالها تماماً ، والذي ازداد هو عدد الإلكترونات المنتزعة . وقد اكتشف المجربون أنه لزيادة سرعتها كان عليهم أن يزيدوا تواتر الضوء لاشدته .

كانت خطـورة التبـاين في هذه الظـاهرة (بـين النظـريـة وبين التجربة) ، تعـادل خطـورة المفـارقـة في ظـاهرة الكـارثـة فوق البنفسجيـة ، هذا على الرغم من أنها ليست بمثـل بريقهـا شهرة . ولم تكن نظرية مكسـويل قادرة على تفسـير هاتين الظاهرتين ، بينما استطاع أينشتين ذلك بفوتوناته بالطريقة التالية :

لقد شبه أينشتين التجربة الكهرضوئية بحقل للرماية ، حيث تلعب الفوتونات دور القذائف ، وتلعب الإلكترونات المهتزة دور كريات تنس الطاولة التي تتراقص فوق نافورة الماء ، وتتحدى بذلك مهارة الرامي .

فزيادة شـدة الضـوء فوق البنفسجي ، يعني ببسـاطة زيادة عدد الفوتونات المنطلقة في كل ثانية . وبالتالي زيادة عدد الإلكترونات المنتزعة من المعدن في كل ثانية . وهذا بالتحديد مالاحظه المجربون .

أمـا الأثر النـاتج عن تغـير التـواتر ، فتفسـيره لايقـل طرافة ورشـاقة عن سـابقـه . وهو أن زيادة تواتر الضوء ، يعني بحسب قاعـدة بلانـك زيـادة طاقـة كل فوتون . وهذا يعني أيضاً استخدام رصاصات ذات عيار أشد . فكلما ازداد التواتر إذاً ، تصبح الصدمة أعنف ، وعندما تصبح الصدمة أعنف ، تصبح سرعة الإلكترون المنتزع أكبر . وهذا أيضاً ما لاحظه المجربون .

وهنا نشير إلى أنه عندما عرض أينشتين تفسيره هذا للمفعول الكهرضوئي ، لم يكن المجربون قد أعطوا قياسات فعلية دقيقة لازدياد سرعة الإلكترونات تبعاً لزيادة التواتر الوارد . لذلك تقدم أينشتين عام ١٩٠٦ بفرضية واضحة محددة بهذا الشأن تعتمد على نظريته عن الفوتونات ، وتستخدم دساتير رياضية بسيطة جداً حتى أن الطالب الذي نال الشهادة الثانوية يستطيع فهمها . إلا أن القياسات الدقيقة أتت فيما بعد ، أي في عام ١٩١٥ ومن أمريكة ، وذلك حين بلغت مع أبحاث ر . أ . ميليكان الكلاسيكية أقصى حدود الدقة . وقد أثبتت هذه القياسات صحة دستور أينشتين بدقة وإتقان لانعثر على مثيل لهما في تاريخ النظريات العلمية إلا إذا عدنا إلى إثبات هيرتز لنظرية الضوء التموجية التي تقدم بها مكسويل . ومن الطريف أن نذكر بهذه المناسبة ، أن أينشتين الذي انتزعت نظريته النسبية العامة بريق نظرية نيوتن في الجاذبية ، هو الذي بدأ بفوتوناته يرد الاعتبار ، وإلى حد بعيد ، لنظرية نيوتن نفسه في الضوء (أي نظرية الإصدار) .

كانت نظرية مكسويل عاجزة تماماً أمام المفعول الكهرضوئي . ولم تستطع أن تبدي مقاومة تذكر تجاه أفكار أينشتين الكمومية الأخرى . في حين أن مجرد القبول بمفهوم الفوتون ، يرينا بشكل مدهش إلى أي مدى تصبح الظواهر ــ التي كانت معروفة وقليلة الشهرة ، ولاتجد تفسيراً لها في نظرية مكسويل ــ متفقة كل الاتفاق مع الفكرة الجديدة . وهكذا جمع أينشتين وتلاميذه لهجومهم المرتقب كثيراً من الحجج التي استقوها من التألق الضوئي والحرارة النوعية وحتى من الكيمياء الضوئية **photochimie** . فكان الفوتون يظهر ، في كل خطوة يخطونها إلى الأمام ، هو الحل الأبسط لهذه المسائل التي لم تستطع النظرية التموجية حلها . والحقيقة أن أينشتين ، حين نال جائزة نوبيل عام ١٩٢١ ، لم ينلها بالدرجة الأولى بسبب نظريته النسبية الخالدة ، بل نالها للخدمات التي أسداها للفيزياء عامة ولنظرية المفعول الكهرضوئي خاصة . ثم مالبث ميليكان أن نال الجائزة نفسها بعد عامين من ذلك لقياساته الدقيقة التي أتت مؤكدة لأفكار أينشتين .

على أن هذا الأمر يجب ألا يذهب بنا إلى حد الاعتقاد بأن أينشتين كان عدواً لدوداً لنظرية مكسويل ، كلا أبداً ، إذ لم تكتف النظرية النسبية بتمجيد المفهوم المكسويلي عن الحقل ، بل أعطت نظرية مكسويل كذلك تبريراً ساطعاً

يعدل التبرير الذي قدمته نظرية مكسويل نفسها لنظرية هويجنز وفرينيل التموجية . ذلك أن نظرية النسبية تقضي بأن يحقق كل قانون فيزيائي شرطاً معيناً صارماً[1] . وعندما امتحنت قوانين الفيزياء المعروفة بهذا الشرط سقط الواحد منها بعد الآخر . وهكذا أصبحت المفاهيم القديمة عن القياس والتزامن وعن الزمان والمكان ، والكتلة والطاقة ، مضطرة لإخلاء الساحة . وأصبحت العودة إلى صياغة الديناميك بمجموعه ، بما فيه قانون نيوتن الشهير عن الجاذبية ، أمراً لامفر منه . ولم ينجح في هذا الامتحان (أي النظرية النسبية) سوى شيئين هامين من كل ما كان يشكل الفيزياء النظرية : أحدهما هو مجموعة قوانين مصونية الكتلة والطاقة وكمية الحركة التي تنص على أن أي واحد من هذه العناصر لايمكن أن يخلق أو يفنى . ومع ذلك ، لم تنج هذه القوانين من بعض التعديل . وأما الشيء الثاني الذي يعرف باسم معادلات مكسويل ، فقد خرج من الامتحان ظافراً دون تعديل . وكان هذا خير تكريم لعبقرية مكسويل .

وقوانين المصونية ـــ التي هي ثلاثة متمايزة في الفيزياء القديمة ـــ جمعتها النسبية في بناء واحد لايتجزأ ، ولايجوز أن تنفصم عراه أبداً . إذ تبين أن الكتلة شكل من أشكال الطاقة ، أو هي في الحقيقة أقوى وأشد أشكال الطاقة المعروفة تركيزاً ، إلا أنها طاقة كامنة . وكان الأمل في تحريرها آنذاك ضعيفاً جداً . لكن قوتها هائلة لاتصدق . فبحسب دستور أينشتين تحسب الطاقة الكامنة في كتلة من المادة بضرب هذه الكتلة بسرعة الضوء ثم مرة أخرى بسرعة الضوء ، فتكون النتيجة كمية لايتصورها الخيال . وهي ما يعرف اليوم بالطاقة الذرية . وقد أمكن اليوم الحصول على جزء من هذه الطاقة التي كانت أول ثمراتها تدمير بعض مدن اليابان . إلا أن نتائجها بالنسبة للإنسانية هامة وخطيرة . ولاسيما إذا علمنا أن القنبلة الذرية ، على الرغم من هول انفجارها ، لم تصرف سوى جزء يسير من كامل الطاقة الكامنة في كتلتها .

هذا عن الطاقة . أما عن الأثير ، فقد كان كبش الفداء لأبحاث أينشتين الرهيبة . إذ وجد أينشتين أنه ، سواء أقدّم براهين بشأن الفوتون أم بشأن مكسويل وموجاته ، فإن وضع الأثير فيها يسير إلى الأسوأ ، ويفقد كل مبرر لبقائه . ففي نظريات

(١) الصمود في تحويلات لورنتز . (المترجم)

الضوء الجسيمية كان الأثير ، طبعاً ، فرضاً زائداً . أما في نظرية النسبية التي استوعبت بيسر أمواج مكسويل الكهرطيسية ، فإن هذه الأمواج احتفظت فيها بحق الوجود من دون أن تكون بحاجة للأثير لتنتشر فيه . فهذا الروح ، أو هذا الجوهر ، الموجود في كل مكان ، حل محله المكان والزمان نفساهما ، إذ أصبح لهذين البديلين (أو لتركيبهما) قدرة على تغيير منحى الأمواج ونقلها . فالأثير إذاً ، كان لابد أن يختفي من الفيزياء بعدما أنهى مهمته ، لأن هذا ما يقتضيه الصالح العام . ولاسيما أن الأثير ، حتى في أيام مجده الغابر ، كان مزعجاً إلى حد بعيد ، فقد كان يزعم أنه أوتي من المزايا المتناقضة ما جعل بعضاً من ألمع رجالات القرن التاسع عشر ــ الذين كانوا متعطشين للكفاح في سبيل الازدهار العلمي ــ يصرفون أوقاتهم في تخيل نماذج ميكانيكية تتمتع بخواص فيها أوجه شبه غامضة مع الخواص التي كانت تعزى له . فكم كانت خسارة العلم جسيمة في هذا المضمار . ولكي نقدر هول المهمة التي أخذ هؤلاء العلماء على عاتقهم عبء القيام بها ، يكفي أن نأتي بمثال عن الخواص العديدة المتناقضة التي يجب أن يتحلى بها هذا الأثير (علماً أن هذا لايعني أن نظرية الكم لم تنجح أيضاً في فهم ظواهر على هذا القدر من التناقض). والآن إلى المثال : لما كان الأثير ينقل الأمواج الضوئية بسرعة مذهلة ، وتنتمي أمواجه إلى نوع خاص يدعى الأمواج العرضانية ، فلايمكن أن يكون مجرد نوع من الهلام الرخو ، بل لابد أن يكون مادة صلبة في أقصى حدود الصلابة ، حتى لتفوق أرق أنواع الفولاذ[١] ، ومع ذلك ، فإن هذا الروح ، الذي تفوق صلابته كل حد ، والذي يجب أن يملأ أصغر ركن وأضيق شق في الكون ، يجب أن لايبدي مقاومة تجاه دوران الكواكب حول الشمس .

ولكن قصة الأثير تنطوي على عنصر مأساوي ، فالخدمات التي أداها بطيبة وعفوية للمساعدة على ولادة نظرية الضوء التموجية ومفهوم الحقل ، وسهره على دوام بقائهما ، كانت لاتقدر بثمن بالنسبة للعلم . ولكن ما أن بلغ ربيباه هذان سن

---

(١) يمكن أن تنشأ الأمواج العرضانية من فتل كرة مثلاً يمنة ويسرة باهتزاز متواتر داخل حوض مائي فتهتز طبقة الماء المجاورة لها بالطريقة نفسها وتنقلها إلى الطبقة التي تليها وهكذا . ولكن هذا الاهتزاز لاينتشر في الماء بسرعة وقد يتخامد بعد مسافة قصيرة . أما في حالة جسم صلب فيمكن أن ينتشر بسرعة (فيما لو أمكن هز جسم فيه) . فما بالنا إذا كان سينتشر بسرعة الضوء . (المترجم)

الرشد ، حتى رمياه دون شفقة أو رحمة ، بل رمياه بفرح وسرور . وقابلا أمانته بالخيانة ، وجعلا أيامه الأخيرة كلها كآبة وسخرية ومذلة . فاستحق منا هذا الرثاء :

في زوايـــا الكـــون كان لم يـــدع أي مكـــان
يحمـــل الضـــوء ليجـري مســـرعـاً طـول الزمـان
ثم وافتـــه المـــنــايـــا بـــين غـــدر وطعـــان
فـــابكِ يـــا عـــين أثـيراً مـــات مكـــلوم الجنـــان

٤ ـــ موجة أم جسيم ؟ صنوان

في القرن السابع عشر ، احتلت النظرية الجسيمية مكان الصدارة في الضوء ، ولم تستطع النظرية التموجية زحزحتها عنه إلا بعد مئة عام . وفي القرن التاسع عشر ، تعاقدت النظرية التموجية مع نظرية مكسويل الكهرطيسية على تشكيل اتحاد استراتيجي بينهما ، حتى لقد تملك الجسيم إحساس بأنه فقد إلى الأبد أمله في استعادة مجده الغابر . ولكن ما أن طلع فجر القرن العشرين ، حتى اندلعت ثورة مضادة لصالح الجسيم .

وعلى الرغم من كل شيء ، فقد ظلت الموجة ، حتى بعد تلك اللحظة ، محصنة بقوة . لأن الجسيم ، بدلاً من أن يحرز نصراً سريعاً حاسماً ، فإنه لم ينجح إلا بإغراق الفيزياء في حرب أهلية عارمة زادت مدتها على ربع قرن ، وانتشرت بسرعة ، حتى أن هدنة عام ١٩٢٧ لم تعقد إلا وكانت الفيزياء بأكملها قد اشتركت فيها .

وقد سبق أن شاهدنا غيوم العاصفة السوداء القاتمة وهي تتراكم ، وكذلك المناوشات وطلائع الهجمات المفاجئة التي تعلن عن اقتراب تلك الثورة العارمة . فما علينا لكي نتابع الآن تحركات المعارك المستعرة ، المتقلبة تبعاً للتقارير التي يذيعها كل طرف عن الموقف ، إلا أن نغتنم فرصة توقف قصيرة لكي نتفحص أسلحة النظريتين المتنازعتين : لأن هذه الأسلحة ستستخدم فيما بعد في ظروف غريبة .

كانت قوى التسلح عظيمة عند الموجة ، إذ كان باستطاعتها أن تطمئن ، فتحتفظ في خط دفاعها الخلفي بقوة احتياطية تتألف من النظرية الكهرطيسية

ومن قياس سرعة انتشار الضوء في الماء . لأن أسلحتها الأصلية ، حتى البدائية جداً منها ، كانت ظاهرياً ساحقة . ولكننا لن ندرس سوى واحدة منها .

قامت الثورة الأولى ، التي شهرت سلاحها ضد نظرية جسيمات نيوتن ، مستندة إلى حقيقة أن الأمواج ، وليس الجسيمات ، هي التي لديها القدرة على التقاطع دون أن تتلف . وقد أطلق على هذه الظاهرة اسم طريف : « التداخل » .

وقد استخدمت فكرة التداخل لتفسير الكيفية التي يحدث بها العلماء ظلاماً من تقاطع شعاعين ضوئيين بدلاً من نور زائد . وهذه التجربة لاتتم إلا بشروط . بالفعل ، لنفرض أننا سلطنا ضوء مصباحين على جدار أبيض مكشوف . فالضوء المنتشر ، سيكون منتظماً إلى حد ما . ولن نشاهد أي شيء غير مألوف . وحتى لو تمكنا من استخدام مصباحين صغيرين كرأس الدبوس ، وساطعين سطوع بريق الصاعقة ، بل ويصدران ضوءاً له نفس التواتر ، فإننا لن نشاهد أبداً شيئاً غريباً غير متوقع .

ولكن دعونا نفرض الآن أننا استعملنا مصباحاً واحداً بدلاً من مصباحين ، وجعلناه يقوم بعمل مزدوج ــ كأن نجعل ضوءه يمر بثقبين بحجم رأس الدبوس مفتوحين في حاجز . ثم تركنا هذا الضوء يسقط على جدار أبيض خلف الحاجز ، عندئذ سيتبدل منظر الحائط . لأن إنارته لن تكون متجانسة ، بل ستشبه ظهر حمار وحش صغير جداً . نظراً إلى أن سطح الحائط سيكون مخططاً بشرائط قاتمة ترسم شبكة دقيقة ومنتظمة . وتدعى هذه الشبكة أهداب التداخل . وهي ناشئة عن تداخل الضوء مع نفسه وحدوث الظلمة . وهذه الأهداب لم تكشف إلا بعد موت نيوتن . ولكن كم كان طريفاً حقاً لو أننا استطعنا معرفة موقف نيوتن وجسيماته من هذه الأهداب . فحتى الآن ليس لها تفسير في إطار النظرية الجسيمية الصرفة . في حين أنها بالنسبة للنظرية التموجية دعم ما بعده من دعم .

لنتخيل مليارديراً بارد الإحساس غريب الأطوار ، أصرّ في ساعة من ساعات عبثه على استخدام شخص ما لتجاربه حول الحالات الانفعالية ، وكان حرسه العتاة يراقبون هذا الشخص بكل يقظة وانتباه ، ومستعدون للانقضاض عليه عند أول

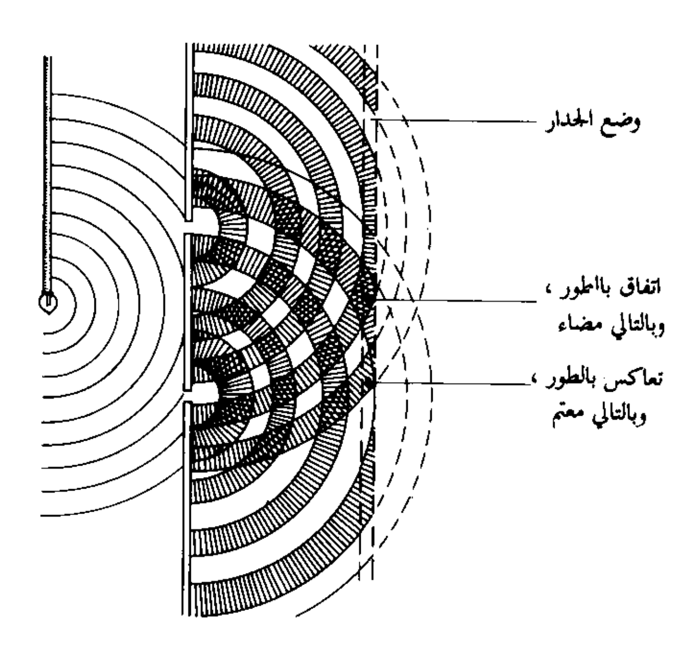
بادرة مقاومة أو ثوران . ثم راح الملياردير يدس بين يدي هذا الشخص ورقة مالية بألف دولار لينتزعها منه حالما يلمسها بإصبعه المرتجفة . ثم ما يكاد الشخص يذعن لفقدها حتى يعيدها إليه ، ولكن ليسحبها منه من جديد ، وحتى قبل أن يمسك بها . فإذا استمرت هذه اللعبة السمجة إلى مالانهاية ، فإن رأسمال هذا الشخص سيتغير تغيرات دورية قاسية سريعة حتى ليصيبه منها قلق ودوار لايمكن أن يوصفا أبداً علاجاً لحالات التوتر الشرياني العالي . والسؤال الآن هو التالي : ترى هل سيكون الوضع مع مليارديرين أسوأ مما هو مع ملياردير واحد ؟ ليس بالضرورة ، فإذا تواقتت حركاتهما ، فإن الوضع سيصبح أسوأ حتماً ، لأن مبلغ الرأسمال سيتغير بعنف أشد بمرتين مما كان . ولكن لنفترض أن حركاتهما كانت متعارضة باستمرار . ففي اللحظة ذاتها تماماً ، التي يسلم فيها الأول المال ، ينتزعه الثاني . وينتج عن ذلك طبعاً أن رأسمال هذا الشخص سيثبت عند القيمة التي كان يحملها قبل التجربة والتي قد لاتتعدى القروش القليلة ، أو لاشيء على الإطلاق . ولامجال بعدئذ للتغيرات المفاجئة ، لأنهما عندما يكونان متعارضين تماماً ، يتداخل عمل أحدهما مع عمل الآخر ، وتكون نتيجة عملهما صفراً .

وبالكيفية نفسها تماماً نفسر تداخل الضوء . فإذا وصلت موجتان ضوئيتان إلى نقطة ما وهما في الطور نفسه من اهتزازهما . فإن هذين الاهتزازين سيقوي أحدهما الآخر ، وستتولد في النتيجة إنارة أشد من كل منهما على حدة ، ولكن إذا وصلا دائماً وهما في طورين متعاكسين تماماً ، فإن اهتزازيهما سيتعارضان وسيلغي أحدهما عمل الآخر . وتكون النتيجة إنارة معدومة ، أي ظلام .

يظهر على الشكل ١ ــ ٢ كيف تحدث شبكة التداخلات على الجدار عندما يمر نور المصباح من ثقبين صغيرين كرأس الدبوس[1] . إن الموجتين المضيئتين الآتيتين من المصباح ، تصلان إلى الفتحتين في وقت واحد ،فالموجتان الجديدتان اللتان تخرجان من خلف الحاجز ، تكونان متفقتين بالطور . ففي بعض الأماكن من الجدار تكون هاتان الموجتان متفقتين دائماً في الطور وتولدان إنارة أشد .

---

(١) هذا مبدأ تجربة ثقبي يونغ . ويونغ هذا معاصر لفرينيل وهو أحد المبشرين أيضاً بالنظرية التموجية .



الشكل (١ ــ ٢)

ولكن في أماكن أخرى ، حيث تكون المسافة عن الثقبين في وضع تكون فيه الموجتان متعارضتين تماماً في الطور ، تحدث الظلمة ، لأن الموجتين في مثل هذه الأماكن تزيل كل منهما عمل الأخرى .

إن هذا التفسير هو تفسير النظرية التموجية الرسمي لأهداب التداخل . وهو من أقوى أسلحة هذه النظرية مضاء وأشدها ضراوة في صراعها مع النظرية الجسيمية . أما هذه الأخيرة ، فلكي تفسر أهداب التداخل يجب أن تفرض أن الجسيم نفسه يمر في آن واحد من الثقبين . وهذا فرض لايصدقه عقل . فلنتفق إذاً مع الفيزيائيين الذين قاموا بهذه التجارب على أن الظاهرة التي نشاهد فيها حوادث تداخل تكون المسألة فيها مسألة أمواج .

فهيرتز مثلاً ، كان برهانه على صحة نظرية مكسويل عن الأمواج الكهرطيسية ، يقوم أساساً على إثباته لوجود التداخلات . كما أن ظواهر التداخل هذه ، هي التي أثبتت أن الأشعة السينية هي أمواج . فحين مررت الأشعة

السينية خلال إحدى البلورات أظهرت على اللوحة الفوتوغرافية الموضوعة خلف البلورة ، وجود شبكة مميزة يمكن تأويلها على أنها نتيجة تداخلات أمواج الأشعة السينية التي اضطربت لدى مرورها خلال توضع الذرات المنتظم في البلورة . وهذه الشبكة ، التي تدعى شبكة الانعراج ، سيرد الحديث عنها مرة أخرى في قصتنا .

كانت النظرية التموجية ، حتى قبل مجيء مكسويل بزمن طويل ، قد سحقت بقوة حجتها نظرية الجسيم السيئة الحظ . فاحتاجت هذه لمئة وخمسين عاماً كي تسترد بعض قواها وتعاود الصراع من جديد . ولم تستطع بعد طول هذا الاستبعاد ، أن تحلم بمهاجمة الموجة صراحة على أرضها الخاصة . فكان لابد لها من اللجوء إلى الحيلة والبحث عن المناطق المظلمة من ساحة القتال ، حيث تكون قوة الموجة شبه معدومة . وهي مساحة مقفرة فقيرة ، بوار ، حتى لقد وجدتها النظرية التموجية أتعس من أن تقيم لها وزناً . وهناك ، كان الدفاع سهلاً ، لأن مدفعية الموجة الثقيلة لم تكن تجدي نفعاً في مناطق على مثل هذا الجفاف . كما لم تكن المقاطعة مؤهلة لعاداتها في الرفاهية والتمدن . لذلك التجأ الجسيم إلى قلب هذه الأراضي الموحشة نفسها ، حيث بنى لنفسه بعناد وإصرار وجوداً جديداً ، ولاسيا بعد أن اكتشف عروقاً ثمينة من الأصفر الرنان في هذه الأرض الصحراوية . وفي بادئ الأمر ، كانت قوة الجسيم بالنسبة للموجة ، كقوة الحصاة بالنسبة للمحيط . إلا أن يقظة الجسيم هبت فجأة وبسرعة ، فشوهد بعد حين يشهر أسلحته ويعبئ قواته التي برزت كالقارات الهائلة في بحار الفيزياء السبعة . ولكي يدافع عن أرضه ، ابتدع أسلحة جديدة لتكون نداً للقوة الهائلة الممثلة بظواهر تداخل الموجة . وكان أشد هذه الأسلحة الجديدة هولاً وأبعدها أثراً هو المفعول الكهرضوئي . فالجسيم كان باستطاعته أن يحتفظ على خط دفاعه الثاني باحتياطي هام هو التحقق التجريبي التام الذي تأكد به ميليكان من صحة دستور أينشتين . وذلك كي يكون نظيراً لخط دفاع الموجة الثاني (أي التحقق من نظرية مكسويل) . ولكن المفعول الكهرضوئي كان يتميز ببساطة البدائي وصراحة حجته المدهشة ، مما جعله مؤهلاً لأن يوضع في خط الدفاع الأول . إذ إن فيه شيئاً يعادل في قوة إقناعه (بأن الجسيم حقيقي) قوة إقناع شبكات التداخل بحقيقة الموجة ، بل ربما تفوقها نصاعة ووضوحاً .

ولكي ندرك ذلك ، دعونا نتصور أننا وضعنا صفاً من القوارير المتماثلة تماماً على طول ضفة النهر . ثم تركناها وقت الغداء . ولدى عودتنا وجدنا قارورة هنا وقارورة هناك مقلوبتين . ولكن معظم القوارير ظلت واقفة في مكانها كما تركناها . فهل من الممكن أن نتصور عندئذ أن موجة عاتية قد طغت على الشاطئ ، وبذلت جهدها في ألا تقلب إلا قارورة أو اثنتين وتترك الأخرى بكل حرص على حالها ؟ إن مثل هذا الافتراض لايصح إلا في بلاد العجائب . لذلك كان الأرجح أن نفترض أن ولداً قد مر من هناك ، فلم يستطع أن يقاوم رغبته في تجربة قدرته على التسديد برمي الحجارة .

والآن بعد هذه الملاحظة ، ماالذي نشاهده في المفعول الكهرضوئي ؟ إننا نلاحظ أن الضوء فوق البنفسجي لايطلق الإلكترونات من جميع نقاط سطح المعدن بالتساوي وبصورة متجانسة ، بل إنه يطلقها من هنا وهناك دون أي انتظام أو تجانس ،إلا، اللهم بالقيمة الوسطى . فهل يتأتى للأمواج أن تحدث مثل هذه الأضرار الاعتباطية ؟ طبعاً لا ، فلا سبيل هنا لاعتبار شبكات التداخل مسؤولة عن هذا الإطلاق ، إذ لاوجود لأدنى انتظام . وكل ما نستطيع قوله هنا ، هو أن الجسيمات الموجهة بمحض المصادفة ، ودون تحديد ، هي وحدها القادرة على إحداث مثل هذا التأثير المتشتت العرضي . فالضوء إذاً مؤلف قطعاً من جسيمات . وإذا ما ظلت لدينا بقية من شك ، فما علينا عندئذ إلا العودة إلى الإيضاح الذي يقدمه لنا الضوء الخافت ذي الشدة الضعيفة جداً . فلنفرض أن الضوء موجة ، عندئذ نستطيع إضعاف شدته إلى حد نفرض معه أنه يحتاج مثلاً إلى نصف ساعة لكي ينقل إلى سطح المعدن طاقة كافية لجعل أحد الإلكترونات يقفز من مكانه . ولما كانت الأمواج المضيئة تغمر السطح كله بالتساوي ، فليس ثمة تركيز على إلكترون واحد ، لذلك من الجائز أن تمر أسابيع تتلوها أسابيع قبل أن يحدث أي شيء على الإطلاق . ثم فجأة ، وبعد تجمع مايكفي من الطاقة ، تأخذ الإلكترونات بالانطلاق من اليمين ومن اليسار وكأنها حاجز للمدفعية في لحظة الصفر . ولكن مايحدث في الحقيقة هو شيء غير هذا على الإطلاق . فالإلكترونات تقوم بقصف متقطع ومفكك ، وهي غالباً ما تبدأ هذا القصف ، حتى قبل أن يمر وقت كافٍ لكي تحدث الأمواج المضيئة تأثيرها بل حتى كأن هذا التأثير كله مركز على نقطة واحدة . وهذا

بالتحديد ما يجب أن نتوقعه من الجسيمات فيما لو تصورنا الضوء مؤلفاً من قذائف من الفوتونات . فعندئذ فقط يكون قذف الفوتونات متقطعاً في حال الضوء الخافت ، وتكون استجابة الإلكترونات مثلها كذلك متفرقة .

فالفوتون ، ربما كان يفتقر إلى دقة الأمواج وقوة تنظيمها ، ولكنه يملك في هذه الناحية سلاحاً من الدرجة الأولى ، يعادل تماماً قوة سلاح الموجة . ولكي نقدر الأمور حق قدرها ، دعونا نستبق الحوادث قليلاً في تسلسل قصتنا ، وذلك لكي نضيف توضيحاً جديداً يبرهن على أن الضوء مكون من جسيمات . ففي عام ١٩١١ ابتكر الفيزيائي الانكليزي س . ث . ر ويلسون بعد اثنتي عشر سنة من الأبحاث ابتكاراً لايقدر بثمن ، وهو غرفة الضباب التي تظهر بوضوح أثر أي إلكترون أو جسيم مشحون يمر فيها ، وفي عام ١٩٢٣ قام الفيزيائي الأميركي أ . هـ . كومبتون بتجربة أساسية لم يكن من الممكن تأويلها إلا بقبولنا بأن الضوء يرتد عن الإلكترون كما ترتد كرة البليار عن رفيقتها عند اصطدامها بها . وهذا السلوك لايتمشى قطعاً مع النظرية التموجية ، بل ولاسبيل للشك في ذلك . وبعد سنتين ، استطاع كومبتون (وكان يعمل آنذاك مع سيمون simon) أن يشاهد في غرفة الضباب آثار صدمات فردية في لعبة البليار الكونية هذه . بل لقد استطاع أن يشاهد مباشرة مسارات الإلكترونات ، وأن يستنتج منها بسهولة مسار الفوتون الواحد اعتماداً على وضع إلكترونين مترافقين صُدما به على التوالي . وهكذا بددت هذه التجارب المتنوعة جميع الشكوك العالقة بحقيقة أن الفوتونات ترتد عن الإلكترونات مراعية بذلك قوانين الاصطدام الرياضية بكل دقة . إذ يبدو من الصعب تصور لعبة للبليار تكون فيها العصي أمواجاً ، وتكون في الوقت نفسه مراعية لقوانين الصدمات . ولهذا السبب (أو لهذا البرهان الواضح) اقتسم كومبتون مع ويلسون جائزة نوبيل للعام ١٩٢٨ .

وهكذا نكون الآن قد استعرضنا أسلحة الطرفين الأساسية . فالموجة لديها ظاهرة التداخل ، والجسيم لديه المفعول الكهرضوئي والطريقة التي يرتد بها الضوء عن الإلكترونات . وقد أمكن التعرف على أسلحة أخرى لهذا الطرف وذاك ، ولكنها أعقد من هذه بكثير . غير أن هذه التي ذكرناها تكفي بالنسبة لغرضنا هنا ، لأنها

فعلاً أساسية وبسيطة وواضحة . فلنر الآن كيف جرت المعركة .

في البدء بدت الأمور كلها مختلطة ، وراح كل من الخصمين يسجل بدوره نقاطاً لصالحه . ولكن مدفعية النظرية التموجية الثقيلة ، تبينت بعد حين عجزها عن الحركة . وهذا ما حدث كذلك للجسيم ، فقد تبين أن البطاريات التي نصبها في الأرض المختارة هي أيضاً ثقيلة الحركة . لذلك ، سرعان ما هبط مستوي الصراع إلى حرب خنادق مما جعل الخصمين في وضع يستحيل معه تسديد هجوم مكلف . فلم يعد باستطاعة الفوتون أن يتقدم في أراضي الموجة ، كما لم يعد باستطاعة الموجة أن تغزو منطقة الفوتون ، وهكذا استقر الوضع الراهن على شكل أزمة مستعصية يتمسك فيها كل من الطرفين بوضعه بثبات دون أن يقوى على مهاجمة الآخر . وأصبح ميدان العلم موزعاً بين معسكرين متخاصمين دون أن يكون هناك كبير أمل في إيجاد حل سريع حاسم أو تسوية معقولة .

وهذا الوضع ليس غريباً على العلم ، فقد ألف أمثاله ، حيث تفسر إحدى النظريتين سلسلة من الحقائق ، بينما تفسر أخرى سلسلة ثانية . ولكن الحالات التي هي على مثل هذا الوضع يكون فيها سبب مقبول لذلك . فمثلاً لم يجد أحد أن هناك ما يستدعي القلق في أن معادلات مكسويل لاتطبق على الجاذبية . إذ لم يكن هناك من يتوقع في سوية معارف ذلك الوقت أن توجد علاقة بين الكهرباء وبين الجاذبية (لم تكن مسألة الحقل الموحد مطروقة) . ولكن الفيزياء تواجه الآن موقفاً آخر جديداً كل الجدة . فالكائن نفسه ، الضوء ، يبدو موجة ، وفي الوقت نفسه جسيماً . فكيف يتأتى لنا أن نتخيل حجمه الخاص ، وشكله أيضاً ؟ كان لابد له كي يحدث التداخلات من أن ينتشر على مدى واسع ، وأما لكي يرتد عن الإلكترون فلابد من أن يكون مركزاً في نقطة صغيرة جداً (متحركة) . فكيف نوفق بين الإثنين . إنها حقاً مشكلة عصيبة ، لقد أصبحت معركة الموجه ــ جسيم أزمة مستديمة مستعصية على الحل ، ولغزاً محيراً يقلق روح كل فيزيائي مخلص . فلايجوز أبداً أن يكون الضوء (أو أي شيء آخر) شيئين متناقضين في وقت واحد . لأن ذلك سيعني أننا سرنا بخلاف كل مثل العلم وتقاليده ، ولاسيما أننا نكون قد أعطينا تلك الثنوية المستعصية على الحل موطناً أبدياً كي تنخر في

السر قواه الحيوية . ومع ذلك ، كان لكل من الطرفين مبررات وجوده الصريحة الواضحة ، حتى ليستحيل استبعاد أحدهما وإبقاء الآخر . فكان لابد من مرور سنين وسنين ليمر الماء من تحت الجسور قبل أن ينجلي الموقف عن مخرج من هذا المأزق . ولم يكن هذا المخرج سوى وصول الهجوم المضاد الساطع الذي قامت به النظرية التموجية . إلا أن الحديث منذ الآن عن هذا الهجوم سيفسد طرافة قصتنا وجدتها . لذلك يستحسن في البدء أن يتبين القارئ بنفسه عذاب فيزيائيي ذلك العهد الذي لم يكن أمامهم فيه إلا أن يحتملوه ــ شاؤوا أم أبوا ــ وأن يتيهوا قلقين بملامحهم القاتمة ، صائحين مرددين بصوت حزين منتحب : بأن الإثنين والأربعاء والجمعة ، عليهم أن ينظروا إلى الضوء على أنه موجه ، وأما أيام الثلاثاء والخميس والسبت فعليهم أن يعتبروه جسيمات . وأما الأحد ، فما عليهم إلا أن يقضوه مصلين ضارعين .

٥ ــ ذرة نيلز بوهر

في عام ١٩١١ ، وهو العام الذي أصبحت فيه معركة الموجة ــ جسيم حبيسة وضعها الراهن المستعصي على الحل ، اجتاز شاب يدعى نيلزبوهر البحار الذي تفصل بلده الأم الدنمارك عن انجلترة ، حيث راح يتابع دراساته هناك . وبعد أن أمضى سنة في كامبردج ، استقر في مانشستر ، حيث كان يعلم الفيزياء أستاذ يدعى رذرفورد . وكان بوهر آنذاك غير معروف عملياً على الصعيد العلمي ، كما أن مهاراته الرياضية لايمكن أن توصف في المعايير المهنية بأنها متميزة . ولكنه أوتى من المواهب الفذة والخيال الجريء والحس الغريزي الثاقب في الفيزياء ، ما لم يحجه لاستخدام الرياضيات المعقدة . وما كان ممكنا للكموم أن تكشف عن كنزها الجديد إلا لرجل من معدن هذا الرجل . لذلك كرَّم مشاهير رجالات العلم الأفذاذ في نهاية الأربعينيات هذا الرجل الهادئ المتواضع ، الذي كانوا ينظرون إليه على أنه قائد الأبحاث الذرية الروحي[١] . وكان قد نال جائزة نوبيل للفيزياء عام ١٩٢٢ أي بعد أينشتين بعام واحد . وقبل ذلك بعامين كان قد عين مديراً لمعهد جديد للفيزياء النظرية في كوبنهاغن ، فأصبح هذا المركز بإدارته الحكيمة مركزاً دولياً للأبحاث الذرية ، يجتذب إليه العلماء الأفذاذ من كل أصقاع الأرض ، ويمارس تأثيراً لايقدر على مجريات علم الفيزياء الموزعة على مجالات مشتتة .

وهكذا نكون قد كوّنا فكرة عن بوهر ، ولكن من هو رذرفورد هذا الذي قدم إليه بوهر ليتابع أبحاثه على يديه ؟

(١) توفي بوهر في ١٨ تشرين الثاني عام ١٩٦٢ .

في عـام ١٨٩٥ ، أي قبـل تفجـير القنبـلة الذرية فوق هيروشيما بما يقرب من خمســين عـاماً ، وكان رذرفورد لايزال فتيـاً ، أذهـل الفـيزيائي الألمـاني و . ك . رونتجن العالم باكتشافه للأشعة السينية . وقد أتى اكتشافه هذا بمحض المصادفة تقريباً عندما كان يجري تجاربه على تفريغ الشحنات الكهربائية خلال الغازات . إذ لاحظ وميض الضوء الذي أظهرته هذه الأشعة في جسم قابل للتوهج (مفلور) موضوع بالقرب من جهازه . لذلك منحت أول جائزة نوبيل للفيزياء في عام ١٩٠١ ، أي عندما أسست هذه الجائزة ، لرونتجن . ولكن لم تكتشف خاصة الأشعة السينية في تشكيل أهداب الانعراج ــ أي تلك الظاهرة المميزة للأمواج ــ إلا في عام ١٩١٢ .

وقد حض اكتشـاف الأشعـة السينيـة على إجراء المزيد من الأبحاث في اتجاهـات متعـددة . وبعـد عـام من كشفهـا قادت العـالم الفرنسـي هنري بيكريل إلى اكتشـاف عرضي أكثر أهمية أيضـاً من الأشعة السينية . لقد فكر بيكيريل على النحو التالي : لما كانت الأشعة المكتشفة حديثاً تسبب ظاهرة التوهج (الفلورة) لذلك بدا من المعقول أن تتولد هذه الأشعة من مواد تصدر أشعتها في الظلام بعد تعرضها للنور . وقد وجد بيكرل فعلاً أن بعض أملاح اليورانيوم تصدر هذه الأشعة بعد تعريضها للضوء . ولكنه اكتشف كذلك ، ونتيجة مصادفة سعيدة ، أن إصدار الأشعة السينية هذا يحدث حتى دون تعريض الأملاح للضوء . وكانت حقاً ظاهرة تدعو للعجب . لقد لوحظ أن أثقل عنصر كان معروفاً في ذلك العهد ، أي اليورانيوم ، يصدر من تلقاء نفسـه أشعة نفاذة . وهو يولدها بطريقة ما ، ودون مداخلة خارجية . فبيكريل تعثر إذاً مصادفة بتلك الظـاهرة التي ندعوها اليوم النشـاط الإشعاعي . وقد بدت في حينها مقلقة محيرة . لأن الطاقة الصادرة عنها ، على الرغم من ضآلتها ، لابد أنها آتية من مصدر ما ، وهذا ما لم يكن بادياً أبداً . فكيف تتولد هذه الطاقة ؟ ومن أين تأتي ؟

إنهـا أسئـلة أثارت فضـولاً لايقـاوم عند وحيدة عصرها ماري كوري حول أشعـة بيكـريـل . وكانت آنذاك عـالمـة شـابة محدودة الشهرة . إلا أنها ظلت لفـترة طويلة ، الشخص الوحيد الذي نال جائزة نوبيل مرتين . فقد تقاسمت جائزة الفيزياء مع زوجها ومع بيكريل في عام ١٩٠٣ . ثم في عام ١٩١١ استحقت أيضـاً جائزة نوبيل

للكيمياء . لقد عمل الزوجان كوري معاً في باريس ، وأعلنا في عام ١٨٩٨ عن وجود عنصرين جديدين تبين أن نشاطهما الإشعاعي أقوى من اليورانيوم . وقد سموا الأول بولونيوم تمجيداً لوطن ماري ومحط آمالها الوطنية ، وسموا الثاني راديوم . ثم أعقبت ذلك أربع سنوات مشحونة بالعمل القاسي المضني الذي تطلب استخراج أطنان وأطنان من النفايات من فلذ اليورانيوم ، ليحصلوا بعدئذ على بضع حبيبات صغيرة من أملاح الراديوم الثمينة .

كان نشاط الراديوم لا يصدق . فهذا الجسم أقوى من اليورانيوم في إشعاعه بمليوني مرة . وهو أنشط المواد المعروفة بلا منازع . ويولد تلقائياً تياراً مستمراً من الطاقة المنطلقة بأشكال مختلفة . فهو يتوهج في الظلام ، ودرجة حرارته أعلى قليلاً من الأجسام المحيطة به ، وقد اكتشف بعدئذ أنه يطلق غازاً ثقيلاً ذا نشاط إشعاعي لم يكن معروفاً حتى ذلك الحين ، مما جعله يصبح سلاحاً لمعالجة السرطان . وعلاوة على ذلك فقد أصبح فيما بعد شاهداً صريحاً على التمرد الرهيب الذي لايهدأ في قلب المادة نفسها . إن كمية الطاقة الصادرة عن حبة الراديوم ضئيلة حقاً . ولكن غالباً ما تنبئ ظواهر تافهة من هذا النوع ، عن حوادث علمية كبيرة حقاً . لقد دشن بيكريل والزوجان كوري عصر الذرة .

ولكن هذا النشاط الإشعاعي الداخلي لم تفهم آليته إلا على يد ايرنيست رذرفورد ومعاونه الإنجليزي ف . سودي . وكانا حينذاك يعملان في كندا ، حيث تمكنا من إجراء سلسلة من التجارب الناجحة التي أظهرت الحقائق الأساسية في سيرورة النشاط الإشعاعي ، وأدت بهما عام ١٩٠٣ إلى وضع نظرية حول تفكك الذرات وتحولها (إلى ذرات أخرى) . وهي نظرية لاتزال بخطوطها العريضة ، مقبولة حتى الآن . ولكن رذرفورد حقق بعد ذلك اكتشافات أخرى عميقة ذات دلالة هامة حول الذرات ، مما جعله أكبر فيزيائي تجريبي في عصره . وفي عام ١٩٠٨ منح جائزة نوبيل للكيمياء ثم كوفئ سودي عام ١٩٢١ بالمكافأة ذاتها .

وبحسب ما رأى رذرفورد وسودي ، فإن الذرات المشعة تنفجر وتتبخر مصدرة ثلاثة أنواع من الأشعة التي دعوها أشعة ألفا ، أشعة بيتا ، أشعة غما

(حيث ألفا ، بيتا ، غما هي أسماء الأحرف الثلاثة الأولى من الأبجدية اليونانية) . وقد تبين أن أشعة غما هي أشعة سينية أشد نفاذاً من تلك التي اكتشفها رنتجن . كما وجد أن أشعة بيتا هي تيار من الإلكترونات . أما أشعة ألفا ، فهي أجزاء صادرة عن الراديوم ، ولكنها ، قطعاً ، ليست راديوماً . فعلى الرغم من أنها تنتج عن انفجار ذرات الراديوم ، إلا أنها من مادة مختلفة هي الغاز الخامل الخفيف جداً الذي يسمى هيليوم ، ولكنه في حالة تأين ، لأن ذراته مشحونة بالكهرباء الموجبة . وعندما تنفجر ذرة من ذرات الراديوم ، لاتكون الجزيئات ألفا وبيتا التي انطلقت منها ، هي الوحيدة المختلفة عن الراديوم ، بل إن الجزء المتبقي منها هو أيضاً من مواد مختلفة . كأن هذا الجزء بدوره يشع وينفجر ، وكذلك بقاياه ، ويستمر الحال على هذا النحو عبر سلسلة طويلة من التحولات التي تتحول فيها المادة إلى أخرى ، إلى أن تصل إلى أكثرها خمولاً وهي الرصاص . وهكذا انفتحت أمام العلم آفاق جديدة واسعة مجهولة .

وفي تلك الفترة ، كانت معرفتهم عن بنية الذرة قليلة جداً . فتومسون مكتشف الإلكترون ، الذي نال جائزة نوبيل عام ١٩٠٦ ، كان قد اقترح على سبيل المحاولة ، أن ينظر إلى الذرة على أنها كرة مشحونة بكهرباء موجبة ، وعليها غطاء من الإلكترونات كما تغطى قطعة الحلوى بالزبيب . لذلك كانت هذه الجسيمات ، التي تنطلق من المواد المشعة بسرعة ، وسيلة عجيبة لسبر أغوار الذرة وإرغامها على كشف أسرارها . ومن ذلك أن لينار الذي نال جائزة نوبيل عام ١٩٠٥ ، لاحظ أن جسيمات بيتا كانت تجتاز الذرات بسهولة ، مما يدل على أن هذه الأخيرة تحتوي فضاءات واسعة فارغة . ولكن ، سبب الحيرة الحقيقي ، كان جسيمات ألفا ، لأنها كانت تعاني صدمات عنيفة من الذرات ، مما جعل تفسير هذه الاصطدامات ، بالاعتماد على نموذج ذرة تومسون ، مستعصياً على الفهم .

لذلك اقترح رذرفورد عام ١٩١١ ــ وكان يعمل آنذاك في منشستر ويحمل جائزة نوبيل ــ نموذجاً ذرياً جديداً لتفسير تلك الاصطدامات العجيبة .لقد برهن أن شحنة الذرة الكهربائية الموجبة لابد أن تكون مركزة في نواة ثقيلة جداً،وأن هذه النواة هي من الضآلة بحيث لايتجاوز قطرها جزءاً من مليون المليون من

البوصة . فاصطدام جسيمات ألفا مع هذه النوى الثقيلة المتراصة ، هو الذي كان يحرفها ذلك الانحراف القاسي ، أما إلكترونات الذرة ، فهي تدور حول النواة على أبعاد هائلة (نسبياً) بدلاً من أن تكون جزءاً من جسمها بحسب نموذج تومسون ، ومجموع شحناتها يعادل تماماً شحنة النواة الموجبة . أو باختصار ، إن الذرة أشبه ما تكون بمجموعة شمسية منمنمة .

ولم يكن رذرفورد هاوياً أو مولهاً (ليرضى بأي حجة) . لذلك لم يتقدم بنموذجه للذرة إلا بعد أن برهن رياضياً أن نتائج تجاربه كانت في هذه النقطة ملزمة قاهرة ، حتى ليبدو رفض التسليم بها ، أشبه بالمستحيل . وللحق نقول إن نموذجه لايزال هو الأساس لكل أفكارنا الحديثة عن بنية الذرة . إلا أن النتائج التجريبية أثبتت ، على الرغم من كل شيء ، أن عيوبه كانت متأصلة بعمق بحيث لم يكن ثمة أمل في استئصالها إلا ضمن إطار معالجة جذرية . لقد تبين أن نموذج رذرفورد لم يكن مؤهلاً لتفسير هذه النتائج . ونورد هنا على سبيل المثال عيبين من هذه العيوب :

إن ذرة رذرفورد ، بحسب نظرية مكسويل ، يجب أن تشع ضوءاً من جميع التواترات . في حين أن المعروف منذ أمد طويل أن الذرات في الحقيقة ، تتمتع بأصالة فردية مميزة ، من حيث تواتراتها ، فهذه هي سبيلنا أحياناً للتعرف عليها . فكل عنصر يختار لشؤونه الشخصية مجموعة من التواترات المضيئة التي تقوم أحياناً مقام العلامة المميزة للصنع في السلع التجارية . ولم ينجح عنصر مرة واحدة في تزوير علامة عنصر آخر . لنأخذ مثلاً الهيدروجين الذي هو أبسط العناصر وأخفها جميعاً . إن المشتغل بالمطياف ، إذا ما أراد أن يجعل الهيدروجين يشع لكي يفحص ضوءه بواسطة الموشور ، فإنه لن يحصل بشبكته المعقدة ، على ألوان قوس قزح ، بل سيشاهد عوضاً عنها نخبة معقدة من بعض الألوان فحسب . ولما كانت هذه الألوان تظهر في الطيف على شكل خطوط ، لذلك تدعى الخطوط الطيفية . وهذه الخطوط يمكن تصنيفها بحسب وضعها (وبحسب مؤشرات أخرى) في فئات . فالمشتغل بالمطياف ، يحسب في حالة الهيدروجين مثلاً ، تواترات مختلف الخطوط ، ويصنفها في فئات ، مما يؤدي في النهاية إلى سلسلة الأعداد التالية (كل فئة في سطر) :

٢٤٦٥٩١............	٢٩٢٢٥٦............	٢٠٨٢٤.............
٤٥٦٧٧............	٦١٦٥٦............	٦٩٠٦٥............
٢٧٤٠٧............	٢٣٣٨٧............	١٥٩٨٧............
....	....	....

وهذه الأعداد ، التي يمكن قياسها بدقة فائقة ، تخفي حتماً مدلولاً عميقاً . فهي ، كما كان معروفاً ، علامة مميزة للهيدروجين بحيث لا يمكن لأي عنصر آخر أن يزورها . لذلك لايعقل أن تكون جملة هذه المنظومة المعقدة من علامات الصنع ، مجرد عرض من أعراض المصادفة ، أو أن تكون كل واحدة منها مجرد « ركام » عرضي من التواترات . فلابد إذاً ، أن هذه الأعداد ، تخفي وراءها أسرار الهيدروجين الشخصية الدفينة . فما هي مهمتها إذاً يا ترى ؟

في نهاية القرن الماضي (وبالتحديد عام ١٨٨٥) استهوى غموض هذه التواترات معلماً مغموراً في إحدى المدارس السويسرية ، ويدعى ج . ج . بالمر **Johann Jacob Balmer** . ولم يكن يعرف آنذاك سوى أربعة تواترات لذرة الهيدروجين . لأن الأخرى تقع خارج المجال المرئي ، أي تحت الحمراء وفوق البنفسجية . ومع ذلك ، فقد نجح بالمر في أن يخلص من هذه المعلومات الهزيلة إلى دستور غريب فعلاً . فعلى الرغم من تطابق معطياته التام مع التواترات الأربعة المعروفة آنذاك ، إلا أن التسليم بدستوره لم يكن سهلاً أبداً ، نظراً لغرابته ، ولأن نجاحه هذا قد يكون عرضياً لاأكثر .

ولقد عبر بالمر عن القاعدة التي اكتشفها بدلالة أطوال الموجات . إلا أننا سنعبر عنها بلغة بسيطة وحديثة ، وبدلالة التواترات . وإليكم القاعدة .

لنأخذ العدد العجيب ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٣٢٨٧٨٧٠ ولنستخدمه في صنع سلم هابط غير نظامي ، بمعنى أن المسافات بين درجاته غير متساوية ، وإنما نحصل عليها من تقسيم هذا العدد بالترتيب على الأعداد ، ١ ، ٤ ، ٩ ، ١٦ ، ٢٥ ، ٣٦ ... إن الشيء المحير في دستور بالمر ، هو أن هذه الأعداد ليست سراً خفياً ، لأنها ليست سوى مربعات الأعداد الصحيحة : ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ... لاأكثر .

فلنا أن نتساءل إذاً : ما علاقة هذا كله بتواترات الهيدروجين التي سبق عرضها ؟ إنها في الحقيقة هنا : إن التواترات الموجودة في السطر الأول تمثل أبعاد الدرجة الأولى عن كل من الثانية والثالثة والرابعة وهكذا . والتواترات الموجودة في السطر الثاني تمثل أبعاد الدرجة الثانية عن كل من الثالثة والرابعة والخامسة إلخ[1] (انظر الشكل) .

وكان بالمر قد استنتج الشيء الأساسي في هذه القاعدة من التواترات الأربع الأولى الموجودة في السطر الثاني . بل لقد ذهب إلى أبعد من ذلك ، وخمن وجود صفوف أخرى . ومع مرور الأيام كانت تكتشف تواترات أخرى جديدة ، لاللهيدروجين فحسب ، بل لعناصر أخرى ، فكان هناك دائماً سلم مماثل لكل منها كما برهن العالم ريتس عام ١٩٠٨ . فنجاح بالمر لم يقتصر إذاً على استغلال معلومات هزيلة جداً لاكتشاف مفتاح صالح لطيف عنصر واحد ، بل لطيوف جميع العناصر . ولكن نجاحه هذا كان متقدماً على عصره ، حتى أنه لم يحظَ لأجله في حياته بأي نوع من التقدير .

كانت الدقة المتناهية التي تتمشى فيها فكرة بالمر مع الوقائع ، وبساطتها العظيمة وظرافتها ، ومداخلة الأعداد الصحيحة فيها بصورة منهجية ، لاتدع مجالاً للشك في أنها دلالة رمزية ذات مغزى عميق على تشريح الطبيعة الخفي . بل لقد كشفت حقاً عن هيكل الطبيعة العظمى . حتى إذا قورنت بها ذرة رذرفورد التي كانت تصر على إصدار الضوء بجميع تواتراته الممكنة ، بدت كأنها مجرد أميبيا ، أو مجرد شيء بدائي جداً .

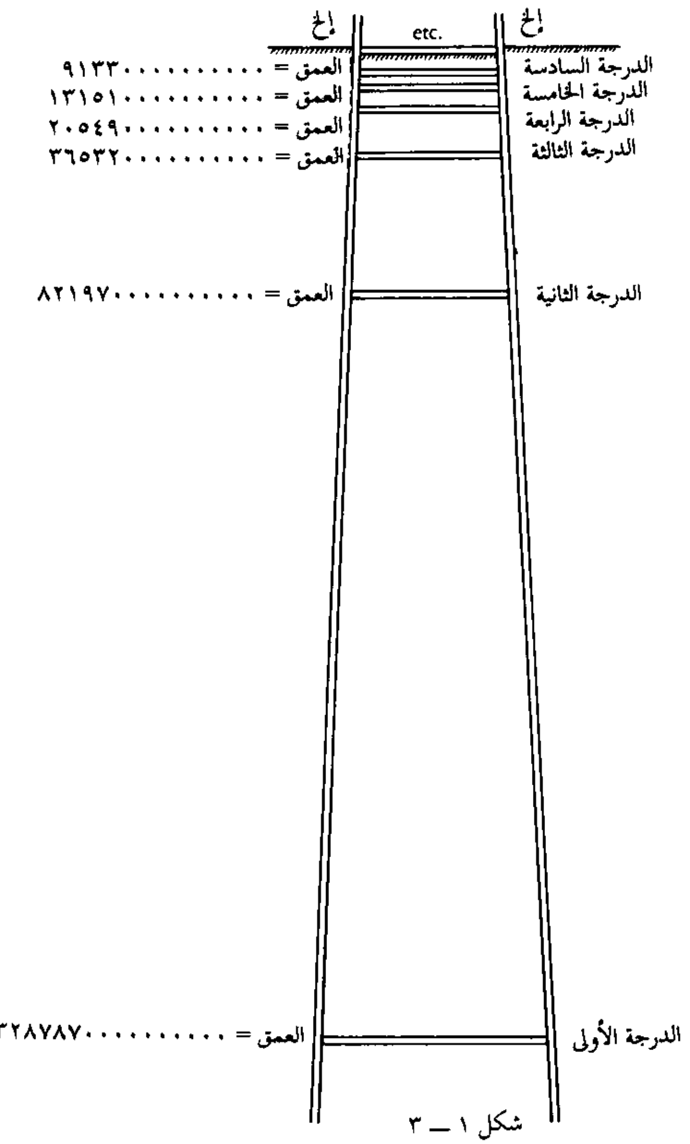
كان هذا الدستور إذاً ، أول حقيقة تعارض ذرة رذرفورد . وأما الثانية فلن يطول بنا شرحها . إنها ببساطة ، التأكيد على أن هذه الذرة ، بحسب نظرية

---

(١) كان دستور بالمر في الحقيقة بعد آن عممه ريتز :

$\nu = k\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ حيث ν تواتر الإشعاع . n_1 ، n_2 عددان صحيحان ، k ثابت يتعلق بطبيعة العنصر ، وفي حالة الهيدروجين ،هو ذلك العدد الذي سميناه بالعجيب .

(المترجم ، نقلاً عن كتاب بوهر)



شكل ١ ــ ٣

(يقصد بالعمق بعد الدرجة عن سوية الصفر . وهو ينتج من تقسيم العدد ٣٢٨٧٨٧٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠ على العدد n^2، حيث n^2 هو العدد المناسب للدرجة من الأعداد ١، ٤، ٩، ١٦ إلخ) .

مكسويل ، هي بنية مستحيلة . لأن هناك فرقاً أساسياً بين منظومة الكواكب التي تدور حول الشمس طبقاً لقانون نيوتن ، وبين منظومة الإلكترونات التي تدور حول نواة الذرة طبقاً لقوانين الإلكتروديناميك[1]. فالكواكب تتحرك بسلاسة حول الشمس وفقاً لمسارات

(١) أي قوانين ماكسويل . (المترجم)

إهليلجية ، بينما الإلكترونات الدائرة حول النواة ، يفترض فيها أن تتصرف بطريقة فظة فلا تقتصر على إطلاق طاقتها على شكل أمواج ضوئية من جميع أنواع التواترات ، بل يجب أن ترسم نتيجة لذلك حلزوناً يقودها بسرعة إلى قلب النواة . فإذا كانت الذرة تتصف حقاً بشيء مما وصفها به رذرفورد ، فكيف يمكنها إذاً أن تستمر في البقاء كل هذه المدة ؟

وبينما كانت ذرة رذرفورد ، عام ١٩١٣ ، تدافع عن حياتها تجاه اعتراضات فاضحة من هذا القبيل ، تدخل الشاب نيلز بوهر في الصورة مزوداً باقتراحات لايمكن إلا أن توصف بأنها بطولية . فقد تساءل مستنتجاً ، ألم نصادف فيما مضى هذا الاعتراض الثاني في حالة الإشعاع ؟ فهل شأننا معه الآن كشأننا مع كارثة مافوق البنفسجي ؟ وإذا كان الأمر كذلك ، أفلن يؤدي حقن هذا المعتل (يقصد ذرة رذرفورد) بالكم إلى منحه صبحة وقوة ؟ ثم ألا يعني هذا بدوره أن وضوح التأكيد التجريبي (الهش نسبياً) لذرة رذرفورد ، لابد أن يشتد على حساب وضوح التأكيد التجريبي الذي كان صارخاً (وأصبح موضع شك الآن) لنظرية مكسويل الكهرطيسية (أي بقاء ذرة رذرفورد ، مع رفض نتائج مكسويل) ؟ حقاً أن حجة رذرفورد تقوم مباشرة على الرياضيات المكسويلية ، ولكن رغبة الباحث في أن يفهم حدسه الخاص كاملاً ، يعني أنه باحث متعبد مؤمن . فبوهر مثلاً ، لم تثبط من عزيمته مثل هذه التفاصيل . وهذا يدل على رأي سديد . لأن التطلع إلى مكسويل ، واللجوء إليه لعدم توافر الأفضل ، لايزال يهدم انتصارات بعض من أحدث نظريات الفيزياء الذرية .

وأما القول بأن بوهر قد ارتكب جريمة فادحة حين بنى نظريته عن الذرة ، لأنه سرق أفكار الغير ، فهذا ظلم وجور . ولكن ما من شك في أنه ليس بريء الذمة تماماً — حتى وإن لم يعترف — تجاه ذلك الإنجليزي الشهير ، والدبلوماسي بالفطرة ، كبير المستشارين في أوبرا أيولانت **Iolanthe** .

لقد وصف المشهد و . س . جيلبرت وصفاً بليغاً . فالجنية أيولانت التي عز عليها أن لاتنقذ كبير المستشارين من تهمة تعدد الزوجات التي لايصح أن يقع فيها رجل مثله ، ولكي تخلص حبكة الأوبرا من انحراف خطير ، كشفت للمستشار أنها هي زوجته الضالة منذ أمد طويل ، فحطمت بذلك نذرها المقدس بالكتمان معرضة

نفسها لعقاب الموت . وبينما كانت الجنيات الأخريات ينظرن إليها بحزن وأسى ، تسلحت ملكتهن بالجرأة ، وأعلنت حكم القدر بالموت على هذه الحبيبة أيولانت .

ولكن ما الذي يجري ؟ هناك ضوضاء مسموعة ؟ بل أكثر ، إنها حركة عصيان . وفجأة يسيطر على المشهد وجهاء المملكة مجللين بالفراء ، وكأن أمراً علياً فوق طاقتهم قد حركهم جميعاً . ترى أي باعث قوي حملهم على المجيء ؟ لاأحد يدري ، فهذا أحد الأسرار المألوفة التي لاتفسير لها في كل أوبرا . ويبدو من تحركاتهم أنهم قد فتنوا بمرأى بروسبيدو الحقيقي وهو يرتدي زيه الرسمي واقفاً في المقدمة ، وعصاه السحرية بيده يحركها لتجعل الألحان تنبع من العدم . ويبدو جلياً أن أنظارهم مشدودة إليه . ومهما يكن سبب حضور هؤلاء الوجهاء ، فقد أتوا في اللحظة المناسبة ، لأنه جعل الجنيات يتجرأن على القيام بمحاولة أخيرة لإنقاذ أيولانت الحبيبة .

الجنية ليليا : إذا كان موت أيولانت أمراً مؤكداً فلابد من موتنا نحن أيضاً معها . لأن الخطيئة التي ارتكبتها ، ارتكبناها نحن أيضاً .

ملكة الجنيات : ماذا تقولين ؟!

الجنية سيليا : ما من جنية منا إلا وتزوجت من دوق أو مركيز أو كونت أو فيكونت أو بارون .

لورد مونتارارات : بل هذا نتيجة خطئنا نحن ، ولم يكن بإمكانهن الفكاك منه وحدهن .

الملكة : بل على العكس ، يبدو من إجماعهن ، أن الحيلة لم تفتهن أبداً (بعد برهة ، مخاطبة الجنيات) لقد حق عليكن الموت جميعاً . ولكنني لايمكن أن أقتل الجميع . ومع ذلك (تبسط لفافة الرق) فالقانون صريح : كل جنية تتزوج من إنسان ، يتحتم عليها الموت .

كبير المستشارين : اسمحوا لي ، وأنا الذي تمرس بالقضاء ، أن أبدي اقتراحاً . لاسيا أن الحذق في الفكر الشرعي لايتجلى إلا في مثل هذه المواقف

الخطيرة . إن المسألة في غاية البساطة فعلاً : ما علينا إلا أن ندخل في نص القانون لفظاً واحداً (هو لم) ليصبح : كل جنية لم تتزوج من إنسان ، يتحتم عليها الموت . وبذلك تزول المشكلة .

الملكة : نقدر فيك هذه الروح المرحة ، واقتراحك مقبول .

هذا ما فعله كبير المستشارين . وهذا أيضاً ما فعله نيلزبوهر . فقد أدخل كذلك ، تجاه موقف خطير حرج ، بضع كلمات . فقد اقترح بدلاً من قانون مكسويل « تدور الإلكترونات حول النواة . فتشع طاقتها وتسقط عليها بالتدريج »القانون التالي « تدور الإلكترونات حول النواة ، فلاتشع طاقتها ، ولاتسقط عليها بالتدريج » .

وبعد أن تجاوز بوهر هذه الخطوة الحاسمة لإنقاذ ذرة رذرفورد بأن جعل من نظرية مكسويل كبش الفداء ، أصبح حراً في صياغة جميع القواعد الجديدة التي كان يحتاجها من دون أن يشعر بالضيق الذي تفرضه مستلزمات التقاليد المكسويلية المألوفة (مثل إشعاع الطاقة ، الاستمرار ..) . وبذلك أصبحت الطريق ممهدة ، فاستبدل بقوانين مكسويل قاعدتين ، أحسن بناءهما ، فحذف بذلك العيب الخطير الآخر من ذرة رذرفورد ، ودعم وضعها بركيزة أساسية .

فالكواكب التي تدور حول الشمس يمكنها أن ترسم دوائر من جميع الأقطار . وكلما كانت الدائرة صغيرة ، كبرت معها سرعة الكوكب . ولكي نلزم الكوكب برسم دائرة ذات قطر معين مركزها الشمس ، يكفي أن نعطيه في البدء سرعة هذه الدائرة ، والباقي تتكفل به الطبيعة . وليس هناك دوائر مخصصة ، بل إن الدوائر كلها تصلح أن تكون مسارات للكواكب بحسب نظرية نيوتن في الجاذبية . وقد تبنى بوهر هذا الشكل العام للذرة متبعاً بذلك خطى رذرفورد . ولكنه أدخل عليه تعديلات هامّة حدّت كثيراً من حرية حركة الإلكترونات حول النواة ، ذلك أنه لم يتبقَّ سوى بعض المسارات المسموحة فحسب . أما الأخرى ، فقد أعلن أنها ممنوعة . وبذلك لم يعد بإمكان الإلكترون أن يشرد على هواه حيث يشاء ، بل أصبح أشبه بالحافلة الكهربائية منه بالحافلة

العادية ، وعليه أن يتبع بدقة المسار الذي حدده له بوهر . إلا أننا سنرى بعد قليل أنه يتمتع مع ذلك بحرية تزيد قليلاً على حرية الحافلة الكهربائية .

وقد عين بوهر مساراته بدقة رياضية استخدم فيها دستوراً كان قد اكتشفه ح . و . نيكولسون من أوكسفورد قبل عام . ولو عدنا القهقرى في الزمن لاستطعنا أن نقدر إلى أي مدى كان مفهوم بوهر الجديد امتداداً مباشراً لفكرة بلانك الجوهرية . فاكتشاف هذا الأخير ، العظيم ، تحول إلى قاعدة تقيد اهتزازات جسيماته المهتزة ببعض السعات فحسب ، مع جعل السعات الأخرى كلها محرمة عليها . وكل ما فعله بوهر هو أنه طبق فكرة الحركات الممنوعة على جسيمات ترسم دوائر بدلاً من أن تهتز على مستقيم . وكان التماثل قوياً ، حتى أنه عندما عممت بعدئذ قاعدة نيكلسون ـــ بوهر على حركات أعقد ، وجد أن القاعدة التي تحدد المسارات المسموحة ، هي نفسها التي تتحكم بالجسيمات الهزازة ، حتى ليمكن التعبير عنهما بدستور واحد . وهذا الدستور يستخدم رمزاً رياضياً بديعاً . وهو لظرافته وبساطته لن يبدو نابياً أبداً إذا عرض في واجهة زجاجية :

$$\oint pdq = nh$$

لأن الهدف من هذا الكتاب ، لايستدعي منا النظر في هذا الدستور بأكثر مما نتمعن في قطعة نادرة معروضة في أحد المتاحف ، حيث نلاحظ جمالها وميزاتها ثم نسرع إلى القطعة التي تليها ونحن نصغي إلى صوت الدليل الرتيب . ولكن لنشر إلى وجود ثابت بلانك h في الطرف الأيمن وكذلك الحرف n . فهذا الحرف n الذي يدعى العدد الكمومي يستخدم للدلالة على الأعداد الطبيعية بحسب ترتيبها واحداً بعد الآخر . فالأعداد الطبيعية كما نرى ، تتدخل إذاً نتيجة تصميم مدروس في الدستور ـــ وهذه نقطة هامة يجب أن نذكرها جيداً لما سيلي من قصتنا .

إن هذا الدستور في نظر الرياضي المحترف مشحون بالمعلومات التي يمكن أن تستعمل في أكثر الظروف . ففي حالة الإلكترونات التي ترسم دوائر حول النواة ، يمكن أن يعني في لغة نيكلسون وبوهر أن عزم الإلكترون الزاوي يجب أن يكون من

مضاعفات عدد بلانك مقسوماً على ضعفي العدد π . ولكن هذه المعلومات تقنية بحتة ، فلنحاول ــ تمهيداً لشروح سترد فيما بعد ــ أن نؤول هذا الدستور الذي يهمنا تأويلاً مجازياً قد يكون أوضح للقارئ .

لنتصور أن مدارات الإلكترونات هي شبكة الأسلاك (الكهربائية) التي تسير الحافلة الكهربائية ، وأننا قد تعهدنا نحن بتمديد هذه الشبكة وقررنا أن نمدد في البدء السلك الموافق لإلكترون يندفع بسرعة معينة . فأخرجنا من جيبنا نسخة من « كراس الجيب لتمديد شبكات الأسلاك » للإلكترونات التي هي حافلاتنا الكهربائية ، وذلك للبحث عن قطر الدائرة المناسبة لهذه السرعة . ثم خابرنا المصنع لكي نطلب منه أن يبعث إلينا بالأسلاك الملائمة لهذه السرعة التي تهمنا . فأرسلها لنا على شكل قطع . وعندئذ تحققنا مباشرة أن المسألة أصعب مما كنا نتصور . لأن المعمل لم يستطع (نتيجة لظروف الصنع غير المعتادة) أن يصنع أسلاكاً على شكل دوائر ، بل أسلاكاً على شكل قطع ذات طول معين تتعلق بالسرعة المحددة . فالمعمل إذاً له كراسه الخاص الذي لاتتمشى إرشاداته تماماً مع إرشادات كراسنا . فسلكنا مثلاً ، يجب أن يكون طوله ١٧ وحدة ، ولكن المعمل لايمكنه أن يصنع لهذه السرعة التي حددناها سوى قطع أطوالها ٣ وحدات (نلاحظ أن العد ١٧ ليس من مضاعفات العدد ٣) . وعلى الرغم من أن الأسلاك قابلة للثني ، إلا أنها مقاومة جداً للقطع (أو يستحيل قطعها) . وفي الوقت نفسه ، لاتكفي خمس قطع ، كما أن ست قطع تزيد عن الحاجة وتؤدي إلى ازدواج السلك عند طرفيه المتصلين ، وهذا غير مسموح للحافلة . فما العمل إذاً ؟ إننا لن نستطيع تسيير الحافلة في الطريق التي حددناها . فما علينا إذاً ، إلا أن نعلن عن استحالة تحديد مسار بهذا الطول . ولكن كيف نريح قوتنا نحن المتعهدين إن تخلينا عن العمل ؟ فعلينا أن نحاول من جديد مع سرعة مختلفة . وبعد البحث ، نجد مثلاً أن السرعة الجديدة تحتاج إلى دائرة طولها ٢٥ وحدة . ولكن المعمل لايستطيع أن يصنع لهذه السرعة إلا قطعاً أطوالها أربع وحدات (٢٥ ليس من مضاعفات ٤) . فالقطع أيضاً ، في هذه الحالة ، لاتلائم الدائرة . وهكذا قد نبلغ مرحلة اليأس ، حتى ليخامرنا الظن بأننا لن نمدد أسلاكنا أبداً . إلا أن البحث النظامي في الكراسين معاً (كراسنا الخاص ، وكراس المعمل) ، سيكشف

في النهاية عن وجود إمكانيات عديدة . وأن هناك حلاً تكون القطعة فيه ، لها طول الدائرة نفسه تماماً ، وهناك حلاً آخر أكبر تكون القطعة المصنعة فيه نصف محيط الدائرة ، وآخر أيضاً يحوي فيه محيط الدائرة ثلاث قطع تماماً ، وآخر أربعة وهكذا إلى مالانهاية . فهذه المسارات هي المباحة ، أما ماعداها فهو محرم تماماً .

وعلى الرغم مما قد يبدو من تصنع وافتعال في هذا التشبيه ، إلا أنه ليس أكثر في ذلك من القاعدة الأصلية التي يمثلها . فأول تعديل أتى به بوهر هو أنه قيّد الإلكترونات بمدارات خاصة بهذه الطريقة الفجة . ولكن الطبيعة اضطرته بعد حين إلى عدم الجمود عند هذا الحد . لأن القيود المفروضة على حرية الإلكترونات كانت عنيفة للغاية ، فكان لابد من إيجاد وسيلة لإرضاء نزعتها الطبيعية إلى التشرد . لذلك خول بوهر إلكترونه بأن يقفز من مدار إلى آخر حين تواتيه الرغبة بشرط أن لايتلكأ في المنطقة المحرّمة ، بل يستقر فوراً في المدار الجديد المباح لكي يتابع فيه طريقه بعزة وثبات ، إلى أن تسيطر عليه رغبة جديدة في التجوال . فالإلكترون لم يعد بذلك حافلة كهربائية ، بل هو تركيب يجمع بين الحافلة والبرغوث .

كانت هذه القفزات — وهي التعديل الثاني الذي أدخله بوهر — تطرح مشكلة من نوع خاص . ذلك أن كل مدار مرهون بطاقة مميزة . فعندما يقفز الإلكترون من مدار إلى آخر ، لابد أن يفقد أو يربح طاقة . فكيف يصبح إذاً قانون حفظ الطاقة الذي ينص على أن « الطاقة لايمكن أن تخلق ، ولا أن تفنى ، بل يتبدل شكلها فحسب » ؟ فهل عاد بوهر إلى نفي هذا القانون ؟ أبداً إطلاقاً ، فهنا تبلغ النظرية غايتها . فالآن أصبح بإمكان بوهر أن يدخل فكرة فوتون أينشتين . إن الطاقة التي يفقدها إلكترون في قفزته ، لابد أنها ستتحول إلى فوتون يتعين لونه (أو تواتره) بقاعدة بلانك (كم الطاقة يساوي جداء ثابت بلانك في التواتر) . وإذا ربح الإلكترون طاقة بدلاً من أن يخسر ، كان ذلك دليلاً على أنه امتص فوتون التواتر المناسب بدلاً من أن يطلقه .

هذه إذاً نظرية بوهر الأصلية عن الذرة . وقد كانت أولى خطواتها هي نفي نظرية مكسويل (الإشعاع في أثناء الدوران) ، وثانيها تحريم جميع المدارات ما

عدا فئة مختارة منها . وثالثها إباحة القفز من مدار إلى آخر بشرط أن يتحمل الفوتون المنطلق أو الممتص مسؤولية فروق الطاقة . وهكذا كانت هذه النظرية ، نظرية عن الإلكترونات الدائرة حول النواة ، أكثر منها نظرية عن الذرة بمجملها . ولو درسناها بإمعان ، لتبينا أنها نسخة مأخوذة مباشرة وبالعبارات النظرية عن دستور بالمر وتابعيه . فالذرات الحقيقية موجودة . وكل ما في الأمر أن بوهر بدأ بإهمال مكسويل . أما الذرات فهي تشع فقط وفق بعض التواترات الخاصة التي هي فروق بين درجات سلم خاص بالتواترات . ولما كانت التواترات تتحول إلى طاقة إذا ضربت بالثابت h ، لذلك أدخل بوهر في ذرته ، وبكل جرأة ، رتباً متدرجة للطاقة ، مخولاً بذلك إلكتروناته أن تسير فحسب في بعض المدارات ، وهذه المدارات تشكل ، إن صح القول ، سلماً للطاقة ، ولكن درجاته دائرية .

ولقد عينت نظرية بوهر تواترات الهيدروجين بدقة مذهلة . إلا أنها كانت مجرد نسخ مباشر لدستور بالمر ، حتى ليصعب أن نوليها رصيداً من الفضل المستحق في مثل هذه الظروف .. إلا أن الأمور لو وقفت عند هذا الحد ، لما أولينا فعلاً نظرية على مثل هذا التعسف والخروج عن المألوف اهتماماً زائداً . ولكن كان ثمة نتيجة جانبية مدهشة لم تترك لنا مجالاً لأن نتغاضى عنها : لنسلم جدلاً بأن كل ما يتعلق بالتواترات الخاصة وفروق السويات كانت قد أدخلت في النظرية ومنذ بدايتها بكل صراحة ودون تردد ، لدرجة أنه كان من المدهش والعجيب ألا نجد آثارها في النهاية . إن الشيء الذي جعل من النظرية نجم الموسم بعد حين ، هو مقدار العطاء الصافي الذي قدمته . لأنها منحتنا ، بالإضافة إلى تفسيرها الكامل لتواتر الهيدروجين ، تفسيراً كاملاً للعدد الغامض ٣٢٨٧٨٧٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠ الذي بنيت المراتب اعتماداً عليه . فكان هذا العطاء ربحاً صافياً لم يرد في العناصر الأولية (في دستور بالمر القديم) ، أو بالأحرى لم يكن من الرسمال ، بل كان نتيجة وهبتها لنا النظرية بطرق يصح أن نقول إنها ملتوية . وهذا ما جعل نصيب نظرية بوهر في تقدم العلم كبيراً وهاماً[1] .

---

(١) كما يشير هوفمان في المتن : هناك تواز حميم بين نظرية الإشعاع الحراري عند بلانك وبين نظرية الإشعاع الذري عند بوهر . وإذا كان ثمة معجزة ، فهي أن قيمتي الثابت h المحسوبتين في النظريتين الأولى والثانية .

لقد وجد أن العدد المقصود هو نتيجة عملية حسابية قليلة التعقيد نسبياً ، تأتي من بعض الثوابت الفيزيائية البسيطة ومن بعض أنفال الرياضيات . وإذا أردتم وصفة حسابية له ، فها هي أمامكم ، معروضة بحسب نظرية بوهر للعام ١٩١٣ .

الفئة الأولى	الفئة الثانية
١ ــ كتلة الإلكترون	٥ ــ ثابت بلانك مرفوع إلى القوة الثالثة
٢ ــ شحنة الإلكترونة مرفوعة إلى القوة الرابعة	
٣ ــ العدد ٢	
٤ ــ العدد π مرفوع إلى القوة الثانية	

طريقة الاستعمال

احسب جداء عناصر الفئة الأولى ثم اقسم الناتج على الفئة الثانية ، تكون النتيجة هي العدد المطلوب . وهي تتفق مع التجربة بانحراف لايتجاوز جزءاً من ألف .

وهذا النوع من الدساتير التي تستخلص من عناصر أولية بسيطة ، يثير بهجة عارمة عند الفيزيائيين . ولاسيما أن التحقيق التجريبي له جاء مؤكداً جداً للنظرية ، لدرجة أن دقته بلغت حداً لو أتى من نظرية صحتها بادية للعيان لكان مذهلاً أيضاً .. بل ليتنا نتأمل في الجانب الأساسي من قواعد بوهر الجديدة ، فهي تبلغ مايشبه الإعجاز ، ولقد أثبتت التطورات اللاحقة بالفعل أن فيها صلة مع المعجزات .

فنيوتن الذي بنى نظريات عظيمة على الأسس التي وضعها غاليليه ، ولد في العام نفسه الذي مات فيه غاليليه . وكذلك بوهر ، فقد ولد في عام ١٨٨٥ وهو العام نفسه الذي أعلن فيه بالمر دستوره .

← متفقتان بتقريب جزء من عشرة آلاف . أما نحن ، فيبدو لنا أن بلانك ، ليس له الفضل فحسب في أنه الأول وأنه صاغ شيئاً مماثلاً لدستور بالمر ــ ريتز وعلى طريقته، بل في أنه ابتكر فكرة الإكام في نمط من الإشعاع ليس فيه ما يوحي بذلك بشكل جلي في مسار النتائج التجريبية . (ملاحظة المترجم إلى الفرنسية)

٦ ـــ ذرة بوهر تتوارى

لقد حقق اختراق بوهر الجريء لعالم المجهول ، خطوة مباشرة في اتجاه التقدم تتمشى تماماً مع أفضل التقاليد الثورية . والحقيقة أن ما فعله بوهر لتحدي مكسويل ليس أكثر من السير على خطا القدوتين بلانك وأينشتين ، وذلك بأن حدد المدارات المباحة التي تجسد أول نداء أطلقه بلانك لرفع شعار الثورة ، ثم إنه أظهر دوراً جديداً للفوتونات ضَمِن به المزيد من النجاح والتأييد لفكرة أينشتين . والحقيقة أن نظرية بوهر كانت النقطة التي التم فيها شتات القوى الثورية المبعثرة التي عرفت عبقريته الملهمة كيف تجمعها . فعناصر النظرية كانت ملكاً مشتركاً لمئات الفيزيائيين . ولكن لم يكن هناك سوى بوهر واحد[١] .

لقد ارتفع شأن نظرية بوهر بسرعة مذهلة ، إذ سرعان ما أثبتت تجارب ج . فرانك J.Franck وج . هيرتز في ألمانية أن سلم تدرجات الطاقة الذي تتطلبه مدارات بوهر ، له وجود فيزيائي (فعلي) مباشر . فاستحقا على ذلك جائزة نوبيل عام ١٩٢٥ . ثم توالت الانتصارات بسرعة هائلة ، فاكتشفت بيسر نتائج نظرية جديدة متفقة تماماً مع التجربة ، حتى كاد النزاع القديم بين الموجة وبين الجسيم ، أن ينسى في خضم هذه الفورة الشاملة . لقد فتح بوهر آفاقاً واسعة أطلت على مناطق آسرة خلابة ، فلم تستطع معها سوى فئة قليلة من الرجال أن تصرف نظرها عن هذه الخصوبة والعطاء

(١) أما نحن ، فيبدو لنا أن فضل بوهر الأول هو أنه فهم مدى شمولية أفكار بلانك وأينشتين ولذلك ، اصبح شيخ مشايخ نظرية الكم . (ملاحظة المترجمة إلى الفرنسية)

لتتأمل في متاهات الصحاري العذراء التي كانت رحى الحرب بين الموجة وبين الجسيم ماتزال تدور على ساحاتها .

ولكن سرعان ما غدا العالم نفسه غارقاً في حرب من نوع آخر ، أسلحتها المدافع والدم والطائرات البدائية ، والتمزق المعنوي ، والغواصات والمجاعات ، والموت الملطخ بالأوحال . فتطوع للخدمة في الجيش آنذاك عالم شاب هو هـ . ج . ج . موزلي Mozeley الذي كان من ألمع العلماء الإنجليز الشبان . ولم تواتِ الحكمة أحداً آنذاك ليثنيه عن عزمه ، فقتل في أثناء هجوم فاشل بالقرب من غاليبولي في الدردنيل ، وكتب نعيه آنذاك رذرفورد نفسه .

ولكن شعلة البحث المجرد واصلت تألقها في الظلمة المتعاظمة . لأن الحروب لم تستطع يوماً أن تخمد جذوة البحث المتقدة المتأصلة ، فأرخميدس كان غارقاً في تأملاته المجردة حين تلقى الضربة القاتلة من عدوه دون أن يفطن إلى وجوده . وفي أثناء حروب نابليون التي أغرقت أوروبة بالدماء ، تمكن مهندسون فرنسيون من القيام بأول قياس دقيق لأبعاد الأرض . كما أتم أينشتين نظريته عن الجاذبية ، أي نظرية النسبية العامة ، في أثناء الحرب العالمية الأولى . وبينما كان صوت المدافع يتردد صداه مدوياً في آذان الجميع ، انطلقت بعثة انجليزية يرأسها إدنجتون نحو جزر بعيدة ، تحمل معها معدات حساسة مخصصة لدراسة كسوف الشمس ، فاختبرت نظرية أينشتين وأثبتت تنبؤه المتعلق بانحراف الأشعة الضوئية . ثم أعلنت للعالم الذي أنهكته الحرب أن العدو الأول لإنجلترة كان يؤوي في كنفه أكبر عالم عرفه العصر الحديث .

وهكذا فإن الحرب وذيولها لم تمنع نظرية بوهر من أن تزداد قوة وأهمية . ولكنها ازدادت كذلك تعقيداً . فمداراتها الدائرية ، احتلت مكانها مدارات إهليلجية ومدارات أخرى أعقد منها . ولابأس في أن نذكر باختصار بعضاً من أبرز مآثرها .

ففي عام ١٩١٣ ، اكتشف الشاب موزلي في أثناء تجاربه على الأشعة

السينية أن هناك انتظاماً ملحوظاً يشير إلى ازدياد شحنة النواة بكميات متساوية من عنصر إلى آخر . فكان هذا تأكيداً رائعاً لنموذج رذرفورد الذري . ثم فيما بعد ، تبين أن التفاصيل الأساسية في أعمال موزلي ليست في الوقت نفسه سوى تأكيد صارخ وبالقوة نفسها لنظرية بوهر .

وعلى الرغم من أن دستور بلانك الأصلي كان متفقاً كل الاتفاق مع التجربة ، إلا أن جسيماته المهتزة لم تكن أكثر من تمثيل تقريبي بدائي للمادة . ففي البدء لم يجدوا إيضاحاً أفضل من ذلك . أما الآن فقد أظهر نجاح نموذج بوهر الذري بجلاء أن الأساس النظري لدستور بلانك ، لابد من تحديثه ليتلاءم مع التصورات الجديدة عن المادة . وهنا تبين أن المسألة أصعب مما كانوا يتصورون . غير أن أينشتين استخدم في عام ١٩١٧ حججاً عامة ، وبرهن من جملة أشياء أخرى ، على أن دستور بلانك للإشعاع ليس وحده الذي يمكن أن يفسر ويعبر عنه بذرات تحوي سلالم للطاقة ، بل إن العلاقة التي افترضها بوهر بين قفزات الطاقة وبين الضوء هي نتيجة حتمية لهذا النموذج ، وهكذا رمى عصفورين بحجر واحد وأكد نظرية بلانك ونظرية بوهر معاً .

ويجب ألا ننسى أيضاً مفعول زيمن الذي اقتسم الفيزيائي الهولندي ب . زيمن لأجله جائزة نوبيل للعام ١٩٠٢ مع مواطنه الذائع الصيت هـ . آ . لورنتس . ففي عام ١٨٩٦ ، درس زيمن ، بعد تأثره بنظرية لورنتس ، الضوء الصادر عن الذرات الموضوعة في حقل مغناطيسي قوي ، فاكتشف أن خطوط الطيف قد ازداد عرضها قليلاً ، كما لاحظ بعد ذلك ، هو وآخرون ، وبعد أن استعان بأجهزة أقوى ، أن كل خط طيفي ينقسم إلى زمرة من ثلاثة خطوط ، وحتى إلى أكثر من ذلك . وقد أمكن تفسير ثلاثيات زيمن هذه بنظرية لورنتس المكسويلية . أما التقسيمات الأعقد من ذلك فمااستطاعت أن تفسرها . كما أن نظرية بوهر نفسها اصطدمت أيضاً بعقبات كبيرة حين جوبهت بهذه الخطوط الطيفية المعقدة . إلا أنها كانت بمستوى تحدي الثلاثيات . فالمدارات المباحة في ذرة الهيدروجين العادية ، تتميز بالعدد الكمومي الوحيد n . ولكن تبين أن عدد المدارات المباحة يزداد تحت تأثير المغناطيس ، الأمر الذي يتطلب وجود عددين كموميين لكل

مدار . وعندئذ أدى هذا الأمر إلى تفسير ثلاثيات زيمن تفسيراً كاملاً ، ما عدا ، اللهم ، تحفظاً واحداً يجب أن يضاف .

وفي عام ١٩١٣ استخدم الفيزيائي الألماني ج . ستارك (حامل جائزة نوبيل للعام ١٩١٩) الكهرباء بدلاً من المغناطيسية التي استعملها زيمن ، فاكتشف ان الكهرباء تؤدي إلى تعقيدات أشد في خطوط الطيف . فحيث كان يوجد عادة خط طيفي واحد ، وجد الآن اثنان وثلاثون أو أكثر . وهنا أبدت النظرية الكلاسيكية عجزها التام أمام هذا الواقع ، ولم تستطع أن تقدم تفسيراً لهذه النتيجة . الأمر الذي جعل نظرية بوهر تحتل مكانة أرفع ، وعزز من انتصارها . لأن شفارتسفيلد وأينشتين ، برهنا كلاً على حدة ، أن نظرية بوهر تفسر بنجاح تفصيلات هذا النمط المعقد من التقسيمات الجزئية بمجرد أن يضاف عدد كمومي ثالث ، ولكن بشرط أن يضاف أيضاً تحفظ واحد . وكان ذلك في عام ١٩١٦ في غمرة الحرب .

ولكن عندما درست الذرات العادية بمطياف قوي جداً ، تبين أن كلاً من خطوط الطيف يتألف من حزمة خطوط رقيقة جداً ، ترسم شبكة هي من الدقة ، بحيث لايمكن أن نميز فيها بالوسائل البدائية سوى الحزمة بمجموعها . وهنا في هذه الحالة ، لاوجود لتأثير خارجي كالمغناطيس مثلاً ليكون سبباً لهذه « البنية الرقيقة » كما تدعى . فأنّى لنظرية بوهر إذاً أن تجد تأثيراً داخلياً يفسر هذه الظاهرة ؟

هنا انبرى النظري الألماني أ . سمرفيلد لهذه المشكلة ، فوجد حلاً لها في عام ١٩١٥ . وكان مفتاح الحل في النظرية النسبية . فبحسب هذه النظرية تزداد كتلة الجسم كلما ازدادت سرعته . وطبق سمرفيلد هذا المبدأ على ذرة بوهر ، واكتشف دستوراً يتفق اتفاقاً رائعاً مع التجربة . ومذ ذاك لم يُجر على هذا الدستور ، الذي اتفق أن وقعت له قصة طريفة ، سوى تعديلات طفيفة في بعض تفصيلاته . ولكن لابد أيضاً من إضافة تحفظ في هذه الفقرة .

كان هذا التحفظ هو نفسه في جميع الحالات ، فنظرية بوهر الأصلية ، كانت معطاءة أكثر من اللازم ، لأنها لاتكتفي بإعطاء خطوط الطيف الملاحظة

وحدها بل تعطي خطوطاً أخرى أيضاً لم تشاهد . وكان هذا التبذير عيباً بارزاً في النظرية ، فقد افتضح أمره في هذه الظروف الدقيقة وفي جميع الحالات التي طبقت فيها تقريباً . لأن هذه النظرية كانت بكل وضوح ناقصة . فهي تستطيع أن تتحدث عن تواترات الخطوط الطيفية ، ولكن ليس باستطاعتها أن تفيدنا بشيء عن شداتها النسبية . ومع ذلك ، فقد كان هناك طبعاً خطوط لامعة وأخرى كامدة . وكان على بوهر أن يجد الوسيلة لحساب هذه الشدات ، فأسعفه الحظ فعلاً في حل هذه المسألة الأخرى ، وذلك بأن اعتبر شدة هذه الخطوط غير المرغوب فيها صفراً . وقد وجد في حوالي العام ١٩١٨ آلية موقتة استقاها من أعماله الأولى في عام ١٩١٣ ، فأكمل نظريته على طريقته النموذجية بإضافة قاعدة أخرى هي مزيج مرتبك من المفاهيم الكلاسيكية والكمومية ، وقد دعاها مبدأ التقابل (وهذا المبدأ سيرد شرحه في فصل آخر) . وقد قام هذا المبدأ بدوره ، بنجاح مرموق ، مثله مثل معظم أفكار بوهر . فقد أزال من جملة ما أزال ، جميع الخطوط الطيفية غير المرغوب فيها ، وأظهر في كل ما تلا ذلك من أعمال استطلاعية واكتشافات ، أنه قاعدة رائدة لايستغنى عنها .

كانت قائمة المآثر الطويلة التي حققتها نظرية بوهر تكفي لأن تشكل صرحاً شامخاً يعبر بارتفاعه عن عظمة بانيه . فعلى الرغم من أن الهيكل الذي يثبت دعائم النظرية كان من أبسط الهياكل ، والرياضيات التي استخدمتها هي رياضيات بسيطة نسبياً ، فقد تعدت جميع أغراضها المباشرة ، وأعطت نتائج تجاوزت كل التوقعات المعقولة . لقد أمسكت منذ البدء بزمام الدراسات التي تتناول الطيف . وأوحت بالعديد من التجارب الذرية الجديدة ، ونسقت بينها . كما قدمت لنا إرشادات ثمينة حول تحليل نتائجها وتأويلها . وعلاوة على ذلك كله ، فقد رفعت الكم إلى مكانته اللائقة ليصبح في واجهة المآثر الأساسية الجديدة في الفيزياء . وكلما تقدمت المعرفة خطوة إلى الأمام ، تجلت أهمية نظرية بوهر التاريخية في تطور الفكر العلمي وأصبحت أكثر وضوحاً .

لذلك ، حين نرى نظرية كهذه ، قادرة على تحقيق مثل هذه المنجزات الطيبة ، ثم تركن جانباً بعد اثنتي عشرة سنة من ولادتها ، يكون ذلك دليلاً مؤكداً على موجة الازدهار العلمي المذهلة في تلك الفترة . والحقيقة أن نظرية بوهر قد

صنعت بيدها هي ، عدوها الخطير الشرس ، فهي لم تكتفِ بتجاهل الخلاف الرهيب موجة ــ جسيم ، بل ضاعفت من أخطائها بأن وجهت إلى هذا الخلاف إهانة لاتغتفر ، فقد حولت الأنظار عنه كل هذه المدة فلا يمكن للنزاع موجه ــ جسيم ، الذي يعد نفسه بحق محور اهتمام الفيزياء ، أن يصفح عن إهانة خطيرة كهذه ، كما لايمكن أن يتسامح مع نظرية تنافسه على مكانته . لذلك أتى انتقامه ، بعد طول تأمل ، رهيباً كاسحاً . في حين أن نظرية بوهر ، لو كانت قد نجحت في إزالة هذا النزاع ، لكان من المحتمل أن تظل حية إلى يومنا هذا . ولكنها لم تكتفِ بمحاباة الفوتون . بل لم تكلف نفسها عناء مواجهة الموجة ، حتى أنها راحت تزرع بجد ودأب حديقتها الخاصة ، متجنبة بكل حرص أي مبادرة ترمي إلى مجهود بناء يرمي لإنهاء الصراع . وقد كانت هذه الانعزالية تعبر عن ضعف خطير في بنيتها ، مما جعلها عاجزة عن الدفاع عن نفسها لتقع بالتالي فريسة التنافر والتناقض الداخلي .

تجاه هذه البوادر الأولى لانهيارها الوشيك ، الذي ظهرت أول أعراضه المزعجة عند إخفاق تنبؤاتها النظرية في تفسير المعطيات التجريبية ، فقد سعت النظرية لإطالة حياتها اصطناعياً إلى ما بعد أجلها الطبيعي بأن تسترت بشكل مناسب خلف عدم دقة مبدأ التقابل . ولكنها كانت تحمل بذور انهيارها في داخلها ، فلم يبقَ سوى القليل لتلاقي مصيرها المحتوم ، فالاختلافات الخطيرة بدأت تظهر بين النظرية وبين التجربة ، مما جعل إخفاءها بالتستر خلف مبدأ التقابل أمراً مستحيلاً . بل إن بعض هذه الاختلافات في الحقيقة لاتمت بصلة لمبدأ التقابل ، وإنما كانت تظهر في الأعداد الكمومية نفسها التي هي عصب النظرية الحقيقي . فقد أظهرت المشاهدات الطيفية أن هذه الأعداد الكمومية غالباً ما تكون أعداداً غير صحيحة ، وإنما أعداداً صحيحة ونصف ، الأمر الذي عجزت نظرية بوهر عن تفسيره . والأسوأ من ذلك أيضاً ، أن نظرية بوهر حين تنص على ضرورة تربيع عدد كمومي ، أي على ضرب ٤ × ٤ مثلاً ، كان التحليل الطيفي يظهر ضرورة ضرب العدد ٤ بتاليه ، أي ٤× ٥ وقد اكتشف المجربون أن باستطاعتهم توليد آثار شاذة لمفعول زيمن تحتل فيها مكان ثلاثيات الخطوط الطيفية ، أكوام معقدة من الخطوط تتحدى مصادر نظرية بوهر كلها . حتى لقد تبين أنها عاجزة عن

تفسير الطيف الطبيعي للذرات التي تملك أكثر من إلكترون . وهكذا سرعان ما اتضح أن موجة النجاح الكاسحة قد غيّرت اتجاهها نهائياً ، وأنها بدأت تسير الآن بقوة عكس نظرية بوهر (أي كما حدث مع نظرية مكسويل) . وما أن حل عام ١٩٢٤ حتى راحت قوى نظرية بوهر تنهار من يوم لآخر ، ساعية باستمرار إلى تغيير مواقعها بجهد يائس لكي تحتمي من ضربات المحن المتلاحقة ، دون أن يكون لديها مع ذلك ، سوى فكرة مبهمة عن عدوها المسؤول المباشر عن وضعها المؤسف . وحينذاك ضاق صدره وتخلص منها فجأة .

تلك كانت نظرية بوهر . لقد شيدت بجرأة وشجاعة ، وظلت على قيد الحياة في خضم هذا العالم السريع التطور . وإذا كان قد قدر لها أن تركن جانباً وبسرعة ، فإن هذا لن ينال أبداً من بريق مجدها ، فقد حافظت على كبريائها في الهزيمة كما في النصر . لأن نجاحها سرغ باكتشاف هذه الاختلافات التي كانت هي نفسها أسباباً واضحة لانحدارها . وما كان باستطاعة النظريات الجديدة التي حلت محلها بعدئذ في الصف الأول ، أن تعيش أبداً أيام طفولتها المضطربة ، لو لم تتحرَ لها نظرية بوهر مجاهل عالم الذرة المتشابك ، وتمهد لها الطريق فيه .

وقد سجلت نظرية بوهر قبل انتهاء أجلها نقطة جديدة . فالكواكب كما نعلم تدور حول محورها في أثناء دورانها حول الشمس ، وفي عام ١٩٢٥ طرح غود سميث S.Goudsmit وأوليمبك G.E.Uhlembeck فكرة مفادها أن الإلكترونات تفعل كذلك في أثناء دورانها حول النواة . لأن هذه الفكرة إذا ما أحيطت بقيود عديدة مصطنعة ، أصبحت قادرة على تحقيق انتصارات باهرة ، يمكنها أن تساعد على تفسير شذوذ الأطياف المعقدة . بل المذهل فيها حقاً أنها تستطيع أن تفسر بنية الخطوط الرقيقة لطيف الهيدروجين ، دون اللجوء إلى النظرية النسبية . وهذه النقطة الأخيرة ، وضعت أمام الباحثين لغزاً محيراً . فقد أصبح السؤال الذي يطرح هو : هل تعزى البنية الرقيقة إلى مبدأ النسبية كما برهن سمرفيلد قبل ذلك بعشر سنوات ، أم تراها ناشئة عن سبين الإلكترون (أي ما يشبه قولنا إن للإلكترون دوراناً حول نفسه كالمغزل) ؟

وهنـا فرض السبـين احترامـه ، على الرغـم مما في فكرته من افتعـال (أو خيال ليس له أساس واضح) ، إلا أنه وصل متأخراً ، لذلك لم يكن له أكثر من أثر ضئيل على مصير نظرية بوهر التي كانت الباعث على وجوده . ومع ذلك فقد تبين أن آثاره في الفيزياء أبعد ما يكون عن الإهمال . فقد اكتشف فيما بعد أن كل نوع من الجسيمات الأساسية في الكون ، لابد أن يكون له عملياً سبين خاص . وهنا نجد من الواجب أن نتحدث عن إحدى الخدمات العديدة التي يسديها السبين .

ففي السـابق وجد العـلمـاء أن عـليهم أن يعزوا إلى كل إلكـترون ثلاثة أعداد كموميـة . أما الآن ، فقد أضـاف السبـين عدداً رابعـاً . وكان هذا الأمر هاماً جداً ، لأن الباحث النظري النمساوي ولفغانغ باولي Pauli ، كان قد بحث مطولاً عن عدد رابع ، وذلك لأسباب تتعلق ببحثه الخاص . وباولي هذا ، كان قد كتب بعد بلوغه العشرين بقليل ، عرضاً فنياً لنظرية النسبية ، ضمنه من التفاصيل أكثر مما كان أينشتين نفسه يعرف عن هذه النظرية . وهذا ما اعترف به أينشتين نفسه بحماس . ثم أنجز باولي بعد ذلك أعمالاً هامة في الفيزياء الكمومية ، عثر في أثنائها على حقيقة مثيرة لايمكن أن تتلاءم مع نظرية بوهر ، على الرغم من مدلولها العميق ، إلا إذا كانت على شكل قاعدة خاصـة جديدة . والطريف أن هذه القاعدة ، التي أهلت باولي لنيل جائزة نوبيل لعام ١٩٤٥ ، هي البساطة عينها من حيث نصها . فهي تقول أنه لايمكن أن يكون لإلكترونين « تشكيلة » الأعداد الكمومية الأربعة نفسها . وهكذا يمكن أن نشبه ذرة بوهر بمُجَمَّع كبير تعيش فيه الإلكترونات في شقق منعزلة ، وكل شقة لها عنوان مختلف : عدد كمومي يشير إلى الشارع ، وآخر يشير إلى البناية ، وثالث إلى الطابق ، ورابع إلى الشقة . فهذه الأعداد الكموميـة الأربعة تمثل العنوان الكامل لكل شقة . وما مبدأ باولي سوى إجراء مصدق يمنع التجمع . حتى ليدعى في لغة العلم **مبدأ الاستبعاد** . ونتيجة لهذا المبدأ ، لايمكن أن يقيم في الشقـة الواحدة سوى إلكترون واحد . ولايمكن لإلكترون آخر أن يدخل فيها إلا بعد أن يخرج الأول منها . وحين اكتشف باولي هذه القاعدة ، لم يكن للإلكترون حينذاك سوى ثلاثة أعداد كمومية . فاضطر في حينها أن يعزو إليه بمحض اختياره عدداً رابعاً . ولكن اكتشاف السبين بعدئذ ، برهن أن الأعداد الأربعة كلها يمكن

أن تخص الإلكترون بشكل طبيعي . كما أمكن أخيراً ، بفضل مبدأ الاستبعاد ، تفسير الأساس الفيزيائي الذي بني عليه التصنيف الدوري للعناصر الذي كان قد اكتشفه الكيميائي الروسي مندلييف وأكمله موزلي . وكانت العادة حتى ذلك الحين أنه كلما وجد أن هناك قاعدة مطلقة، تقيد حركة الشيء بشكل أو بآخر ، فسر هذا التقييد بأنه نتيجة قوة إضافية.غير أن الوضع في مبدأ باولي ، لم يحتج لقوى زائدة (لالزوم لها) . فقد تجلت فيه تأثيرات من نوع جديد كل الجدة ، حتى لقد عبّر البعض عن ذلك بالقول إن الإلكترونات تنبه بكل أدب إلى هذا المنع من الدخول ، وأنها ترضخ للأمر بطيبة خاطر . فكان مثلها ، مثل من لم نحتج إلى قوى الشرطة لتمنعه من احتلال أماكن الغير ، بل كفاه أن توضع بطاقة واضحة على الباب كتب عليها « حصبة » أو « نكاف » .

ومبدأ باولي ، مبدأ أساسي في جميع الأبحاث الحديثة . إنه يطبق على جسيمات أخرى غير الإلكترون . ومن المعروف أنه مرتبط بآثار تلعب دوراً في مصير النواة من داخلها . وإذا كانت الكيمياء قد بلغت ما هي عليه الآن من تقدم ، فما ذلك إلا بفضل سريان مبدأ الاستبعاد . ولم يعثر أبداً على استثناء واحد في الطبيعة بالنسبة للجسيمات التي يطبق عليها . كما لايوجد في العلم تفسير كامل مماثل .

وعلى الرغم من أن سبين الإلكترون ومبدأ باولي قد تم اكتشافهما تحت سلطان بوهر ، إلا أنهما ينتميان إلى عصر متأخر يلي عهد بوهر . لذلك كانا غير قادرين على إيقاف هذا المد المعادي ، فلم تعد نظرية بوهر بعدئذ سوى ذكرى . ولكن اسم بوهر لن يختفي من قصتنا ، فهو مثل أينشتين ما زال له دور سنرى كيف سيلعبه في تاريخ الكم العجيب .

والآن ، وقد آن الأوان لكي يسدل الستار على الفصل الأول (كما في مسرحية هملت)[١] فإننا نشتم رائحة عفن في وضع هذه النظرية ، التي قدمت إلينا من الدنمارك .

---

(١) وهنا نذكر القارئ بأن هملت (مثل بوهر) هو أيضاً أمير دنماركي . وكما يتحسس هملت أن في قصة عمه ووالدته شيئاً دنساً عفناً ، كذلك هنا ، يبدو أن الأمور لم تكن تسير كلها سيراً حسناً مع النظرية ، وهذا على الأرجح ما يلمح إليه المؤلف . (المترجم)

٧ ــ تحذير إلى القارئ

لقد احتفظت قصتنا ــ حتى الآن على الأقل ــ بما يشبه المنهج المنظم ، فقد شهدنا يقظة الفيزياء الكلاسيكية بجلالها ، ورأيناها تبلغ ذروة المجد عند تحقق نظرية ماكسويل تحققاً كاملاً . ثم شهدنا بداية الثورة التي قادها بلانك وتوسعها المنذر بالعاصفة تحت قيادة أينشتين . وأخيراً شاهدنا حالة الشلل الغريبة التي توصلت إليها . وتتبعنا بين هذا وذاك السويعات القليلة لنظرية بوهر الذرية المجيدة ، ورأينا مآسيها وأحزانها ، وعشنا معها منذ ارتفاع شأنها المذهل حتى أفوله السريع الذي جر العلم إلى هاوية اللايقين وفوضى الارتياب .

على أن هذا كله ، إذا ما بدا مناهضاً للتقدم العلمي ، وأنه ليس سوى تتابع ممل للمام مشتت متنافر ونظريات متناقضة مبنية كلها على رمال متحركة ، وليس تقدماً مستمراً في وعينا للطبيعة ، وإذا ما بدا ذلك محطماً ، وإلى الأبد ، لإيماننا بحكمة العلماء ونزعتهم العقلية ، ولكل ثقة بمنهج علمي كهذا يؤدي إلى تناقضات ممجوجة ، فما من شك عندئذ في أن الأحداث المقبلة ستبدو أسطورية قطعاً وغير منتظرة . لأن هذه المسيرة ستتسارع فجأة ، وعندها سنرى أن ما سيوشك على الانفجار ليس الذرة ، وإنما النظرية الذرية نفسها .

وما سنرويه الآن يمكن تشبيهه باندفاع سيل عارم ، حتى ليستحيل فيه ، ولفترة من الزمن ، رؤية تسلسل متصل لأحداثه ، وستصبح الفيزياء أشبه بإعصار تغلي فيه الأفكار الغريبة التي لن يستطيع أن يميز فيها بين التبر والتراب سوى صاحب عقل ثاقب وبصيرة نافذة . فحتى الفيزيائيون المحترفون ، تاهوا في هذا التيار العارم ، فجرفهم إلى

حيث لايعلم مصيرهم إلا الله . فكان لابد من مضي سنوات قبل أن يثوب الباقون على قيد الحياة إلى رشدهم ، ليتحققوا بعد استرجاع الأحداث ، أن الضيق والاضطراب الذي طغى على علمهم لم يكن سوى مؤشر على ولادة عصر جديد أكثر عظمة من سابقه .

فإذا كنت أخي القارئ قد تابعت الحكاية حتى الآن ، فلا أظن أن جرأتك ستسمح لك بالتخلي عن متابعتها . لقد دفعت ثمن تذكرتك ، وتتبعت السفح حتى قمة أعلى جبل في هذه الأصقاع ، فهاأنت الآن مضطر لأن تتحمل الرحلة حتى نهايتها . فلاتحاول إعادة تذكرتك . لقد نبهتك منذ البداية إلى ما ينتظرك من أحداث . وإذا شعرت بالدوار والخوف أمام مشهد هذه المرتفعات الشاهقة ، فلاتلم إلا نفسك . حقاً أن الرحلة قاسية ، ولكني أعدك بأن تشعر بإحساسات رائعة لم تشعر بمثلها في حياتك كلها . فتمسك إذاً بمقعدك جيداً لكي تتمتع بملذات الرحلة وأتعابها ، لأننا سنهوي في فضاءات يزوغ فيها البصر وتلف الرؤوس .

٨ ــ اكتشافات الأمير الثائر

كان بوهر يعـرف حق المعرفـة أن النجـاحـات العـديدة التي حققتهـا نظريتـه في بـادئ الأمر ، لم تكن قادرة على إخفـاء معـايبهـا . لأنه كان عارفاً بأنه صب خمرة الكـم الجديدة في دنـان الخمـرة القديمة (إذ إن نظريتـه ، كانت مزيجاً من الميكـانيك الكـلاسيكي ، ونظرية الكـم) . ولكن هذه الخمرة الممزوجة كانت لذيذة لدرجة أن الرجال لم يستطيعوا مقاومتها . فبعدما شربوا منها حتى الثمالة ، انطلقوا يقتحمون البقاع التي كانوا فيما مضى يخشون المجازفة بارتيادها . وراحوا يتقدمون بعيداً في فتوحاتهم غير عابئين بما ينتظرهم من حساب . وعندما تحطمت الأقداح والزجاجات ، أفاقوا من نشوتهم ، وإذا هم كالضالين في قلب أرض غريبة ، لاهادي لهم فيها ، ولامصدر إلهام .

وقد عـبر مـاكس بورن ، الفـيزيائي الألمـاني ، عن هذا الضيـاع بأسـلوب معـبر حي . ففي نهـايـة العـام ١٩٢٤ ، كان قد انتهى من وضع كتـاب عن النظرية الذرية كتب على غلافه « الجزء الأول » مع أنه كتب فيه كل ما كان يستطيع قوله آنذاك . وهنـا نتسـاءل : لماذا إذاً دعاه الجزء الأول ، مادام لايملك شيئاً يقوله في الجزء الثاني ؟ والجواب : لأنه كان على يقين من أن نظرية بوهر محكوم عليها بالفشل ، وأنه لابد من ظهور نظرية جديدة كل الجدة تحل محلها ، لذلك صمـم ، إن أمد الله في أجله ، أن يخصص الجزء الثاني لهذه النظرية ، التي كانت لاتزال طي الغيب إلى حين .

وواقع الأمر أن هذه النظـريـة ظهـرت ، وكتب بورن الجزء الثـاني في وقت أبكر مما كان يتوقع . بل ظهر القسـم الأعظم من هذه النظرية الجديدة في العام نفسه

وعلى مرأى منه ، حتى لقد ساهم مساهمة جلّى في تطويرها وتأويلها . لابل إن الطلقة الأولى التي أعلنت عن عصر جديد للفيزياء ، كانت قد أطلقت ، وأخذت أصداؤها تتردد في الوقت نفسه الذي كان يحرر فيه جزأه الأول .

وكان شــرف تدشـــين هذه الثـورة على يد الأمـير لوي دو بروي المتحـدر من عائلة فرنسيـة عريقـة ونبيـلة . إذ سبق لهذا الأمير أن نشـر بعض الأفكار الجديدة في عام ١٩٢٢ . ثم في كانون أول (ديسمبر) من عام ١٩٢٣ ، دفع للطباعة بمخطوطه الرئيسي الذي ضمنه أعماله المستمدة من هذه الأفكار . أي قبل أن ينشر بورن كتابه بما يقرب من عام واحد . غير أن أعمال دوبروي لم تقبل في ذلك الحين ، فلا يجوز ، بل ولايمكن أن يستند إليها بورن في الجزء الثاني من كتابه . لذلك ، كان لابد لمحتويات هذا الجزء من انتظار فصل آخر ، لأن القصة كما سبق أن نبهنا القارئ ، ستتعقد .

فبينما كان النقـاش مايزال محتدماً بين العـلمـاء تحت راية نظرية بوهر ــ التي أخذت تظهر عليهـا آنذاك علامات الضعف ــ فضــل دوبروي من جهتـه أن يدرس بهدوء أفكار أينشتين حول النسبية . وكان اهتمامه موجهاً للضوء أكثر من المادة . ولكن فكرة طارئة عرضت له في أثناء تأملاته ، وهي أن يعزو للفوتونات كتلة خاصة بها . وهذه الفكرة ، وإن كانت غير مقبولة حالياً ، إلا أنها قادت دوبروي إلى اكتشاف يعد الآن في المرتبة الأولى بين اكتشافات الفيزياء . لأن فوتوناً من هذا القبيل ، يصبح فعلاً شبيهاً بجسيم مادي . هذا فضلاً عن أن التعبير الرياضي عن هذه الفرضية ، يدلنا على وجود توازٍ تام ومهم ، بين سلوك الفوتونات وسلوك الجسيمات .

وهكـذا لم يكن أمـام دوبروي إلا أن يقدم على العمـل بعدما تجمعت لديه الأدلة . إذ إن الزعم بعدم وجود فوتونات في الضوء ، هو حماقة . كما لايمكن أن ننفي من جهة أخرى أن الضوء موجات . فالفوتونات والموجات يجب أن يوجدا معاً . ثم إن بين الضـوء والمادة صـلات قوية في النظرية النسبية . لأن الأول والثانية يظهران فيها بشكل طاقة . لذلك ، نستطيع ، إذا وضعنا نصب أعيننا هذه المعطيات ، أن نستعرض تسلسلاً في العلاقات يؤدي بنا إلى نتائج مثيرة فعلاً وطريفة . فالطاقة بحسب قاعدة بلانك تساوي

h مرة من التواتر . وهكذا تستجر الأفكار بعضها بعضاً على النحو التالي :

إن جسيمات المادة لها كتلة
والكتلة شكل من أشكال الطاقة
والطاقة تعني التواتر
والتواتر يعني الاهتزاز

لذلك ، سنصل بعد أن نسترد أنفاسنا لبرهة ، إلى النتيجة التالية : إن الجسيمات تهتز ، فلنتابع :

وبما أن الجسيمات تهتز ، فهي تشبه بشكل غريب الفوتونات
ولكن الفوتونات لها صلة بأمواج الضوء
فالمادة إذاً لابد أن يكون لها صلة « بأمواج مادية »
ذلك لأن المثل الشعبي يقول : إن المرق الصالح للحساء ، يصلح أيضاً للثريد .
فما يصلح للفوتونات يصلح أيضاً للجسيمات المادية .

ولكن القناعة المبنية على مؤشر هش كهذا تعد مخاطرة حقيقية . لأن التأكيد على أن كل هباءة مادية تنبض بالاهتزاز ستصاحبها موجة معينة لمجرد كونها تهتز ، هو كالتأكيد بأن البحار العريف الذي يتأوه بانتظام ، ستصاحبه عروس البحر ، مع أنه ربما كان يحلم بها فقط . « فلا مفر لدوبروي إذاً من البحث عن أسس نسبوية أقوى »[1] .

بما أن النسبية مزودة بأكثر من حيلة ، لذلك سرعان ما وجد فيها دوبروي صلات قربى معبرة جداً بين الجسيمات وبين الأمواج . ولكي نتتبع أحد خطوط محاكاته ، علينا أن نعرف حقيقة خاصة عن النظرية النسبية سنتحدث عنها في حينها . أما الآن ، فلننس الأمواج لبرهة من الزمن ولنركز انتباهنا على الجسيمات المهتزة . إن بمقدورنا

---

(١) هاملت . الفصل الثاني : المشهد الثاني ، نهاية المناجاة الذاتية (حاشية لمترجم النسخة الفرنسية) .

أن نعين بشكل جيد ، إيقاع اهتزازها بالضبط ، إذ نستطيع استنتاجه مباشرة من تسلسل العلاقات الذي بيناه أعلاه . إننا نعرف كتلة هذه الجسيمات ، فنلضربها بمربع سرعة الضوء ، فنحصل بحسب قانون أينشتين على طاقتها . لنقسم هذه الطاقة على ثابت بلانك ، فنحصل مباشرة على تواترها . وهذا التسلسل ، على الرغم من أن فيه بريق النزوة والشذوذ إلا أنه دقيق تماماً من الوجهة الرياضية . وقد خرجنا منه بنموذج الجسيم المزود بمعدل اهتزاز معين .

لنركز انتباهنا الآن على الاهتزاز الصرف . فإذا كتبنا الدستور الرياضي المعروف المتعلق بهذا الاهتزاز ، أمكننا أن نؤوله بطريقتين : إما على أنه تعبير عن ضربات قلب داخلي ، وإما أنه تعبير عن اهتزاز ينتشر إلى الخارج . وهذا ما أدخل شيئاً من الثقة في نفس دوبروي ، ذلك أن استخدام التأويلين معاً ، لن ينجم عنه أي تناقض رياضي . وهكذا أكد بالتالي أن الجسيم ، عندما يكون ساكناً ، لايقتصر نشاطه على خفقان موضعي مركز عليه فحسب ، بل يصاحبه اهتزاز ممتد متزامن بشكل دائم مع الخفقان وينتشر في كل الكون ، حتى ليمكن تشبيهه بمحيط يرتفع سطحه ويهبط كأنه قاعدة مصعد ضخم يملأ أرجاء الكون ، وهذه طبعاً ليست أمواجاً بالمعنى المألوف للكلمة ، ولكنه مجرد صعود وهبوط منتظم . وهل في ذلك من عجب ؟ مؤكد ! ولكن ليس أبداً أعجب من فوتون بلانك وأينشتين ، أو من ذرة بوهر ، أو من كثير من الأمور التي رُوِيَت أو ستروى (أرجوكم ، لاتنظروا بعد الآن من فوق « الجبال الروسية »[٢] ، إننا في موضع شاهق الارتفاع ، ولابد أن تألفوا الأحاسيس الجديدة في الفيزياء) .

فبعدما ذكر ، لابد أن يُنظر إلى كل جسيم في حالة سكون ، وكأنه مغمور في اهتزاز ممتد امتداد الكون ، أو بالأحرى تهتز فيه جميع أرجاء الكون (كسطح المحيط) بخطوة واحدة وفي آن واحد ؟ هل قلنا في آن واحد ؟ إن النسبية ستنفر من هذا التعبير ، لأن أول شيء فعلته في حياتها هو مهاجمة مضمون هذا التعبير ؟ لذلك

---

(٢) الجبال الروسية : لعبة فيها سكة حديد ترتفع وتنخفض بشكل عنيف وعليها مركبات يركبها الأطفال . وهي من الألعاب التي لا تتوافر إلا في مدينة ملاهي . (المترجم)

ستفتح أذنيها جيداً ، ثم تشرع في إلقاء خطاب هادئ متعاظم ، تؤكد فيه بكل إصرار على أن التزامن أمر نسبي ، وستقول : « حاولوا أن تحركوا جسيمكم قليلاً ، وسترون أن آنيَّتكم ستختل ، فلاتقولوا إني لم أحذركم » .

لذلك يحسن بنا أن نوضح بعض الأمور بشأن هذه النسبية الرشيدة . فمشكلة التزامن مشكلة تهمها جداً ، بل إنها بدأت منها حين قوضت مفهوم التزامن من أساسه . فبحسب النسبية ، إذا رأى أحدهم حادثين متباعدين يحدثان في آن واحد ، فإن هذا لايعني أن أي شخص آخر سيتفق معه بالرأي ، وبأن الحادثين متزامنان . ذلك ، في الحقيقة ، لأنه إذا كانت المسافة الفاصلة بين الحادثين كبيرة ، وكان أحد المشاهدين متحركاً بالنسبة للآخر ، فإنهما سيختلفان قطعاً لامحالة . واعتماداً على هذا الاكتشاف بنى أينشتين مجمل نظريته النسبية ، وتوصل منها إلى كل ما يترتب عليها من نتائج غريبة . ولاسيا تلك النتيجة القائلة ، لايمكن لأي إشارة من أي نوع أن تنتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء . بينما في السابق ، إذا حدث اهتزاز ما أينما كان في خطوة واحدة ، فإنه سيبدو كذلك أينما كان ، وهذا كل ما في الأمر . ولكن هذا غير صحيح بعد سيادة النسبية ، فمنذ أن يخطو الجسيم أو الراصد أول خطوة في حركته ، يصبح مستوي التزامن كله باطلاً . وهذا ما دعا أينشتين في عام ١٩٠٥ إلى أن يصيح في العالم كما فعل هملت قبله بزمن طويل :

« لقد اختل سير الزمن ... » .

فأثار بذلك الاضطراب في نفوس الفيزيائيين الذين أخذوا يتذمرون من إقلاق راحتهم التي كانوا ينعمون بها ، وتابعوا قائلين :

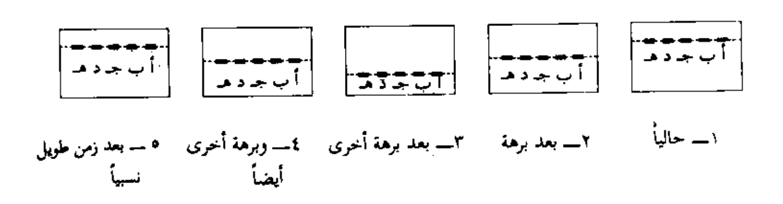
« ياللمصيبة ..
وهل ولد فقط لكي نقومه »[١] .

---

(١) هاملت ، الفصل الثاني ، المشهد الخامس . (وهملت طبعاً يتحدث عن الإنسان والمجتمع ، بينما صيحة العلماء هنا عن الزمن ، أي هل ولد الزمن فقط لكي نقومه ونصححه باستمرار) . (المترجم)

كان دوبروي ملماً بكل طباع النظرية النسبية . إذ إن أينشتين كان قد أعطى دساتير رياضية واضحة محددة لتطبق على اختلال التزامن . فكان باستطاعة دوبروي إذاً أن يطبقها على اهتزازاته ، وأن يرى ما الذي يمكن أن يحدث إذا انتقل الجسيم . وها كم ما حدث ، فلقد تحولت الاهتزازات إلى أمواج . وقد يكون يسيراً علينا أن نفهم الخطوط العريضة في هذه الظاهرة . إذ ما علينا لكي نفهمها إلا أن نتذكر أن الحركة بحسب مبدأ النسبية تفسد التزامن . ولكن فهمنا لهذا الأمر لايعني أننا فسرنا الدقائق الدفينة في النظرية النسبية ، ولا أن هذا يكفي لجعل فكرة التزامن المختل نفسها مستمرأة يسهل قبولها . إن غايتنا على كل حال ، هي أن نحاول معرفة الطريقة التي يمكن أن تتحول فيها الاهتزازات إلى أمواج . فدعونا نثق إذاً ببطلان هذا التزامن ، ولنرَ كيف تتم عملية التحول .

لنتصور سلسلة من قطع الفلين أ ، ب ، جـ ، د ، هـ طافية على « سطح المحيط » تفصل بينها مسافات متساوية . إن الشكل التالي يظهر أوضاعها في لحظات مختلفة (في أثناء هزة كاملة للسطح) :



شكل ١ ــ ٤

فهذه القطع ستعلو وتهبط كلها مع سطح المحيط محتفظة بالسوية المشتركة فيما بينها ، وكأنها جوقة واحدة . ولكن إذا افترضنا أننا قصيري النظر بحيث نضطر للاقتراب كثيراً من قطعة الفلين لكي نراها ، عندئذ لن نستطيع رؤية القطع كلها معاً . فنلقي نظرة خاطفة على « أ » ثم نسرع إلى « ب » وبعدها إلى « جـ» فـ « د » ، وأخيراً إلى « هـ » . وفي أثناء هذه التنقلات سيثابر سطح المحيط على الاهتزاز ، فأي انطباع سيتكون لدينا إذاً

عن وضع القطع ؟ سنرى « أ » كما تبدو في الوضع الأول (الأيمن) وسنرى « ب » كما تبدو في الوضع الثاني ، وسنرى « جـ » كما في الوضع الثالث ، وهكذا .. فسطح المحيط سيبدو شيئاً من قبيل الشكل التالي :



شكل ١ ــ ٥

أي أننا في الحقيقة سنتصور سطح المحيط ، له شكل متموج . وهذا التموج هو نتيجة حتمية لعدم قدرتنا على رؤية القطع كلها معاً . ولكن ما شأن النسبية في كل ذلك ؟ ألا تنص على أنني إذا سرت أمام قطع الفلين ، وأنت لم تفعل ذلك ، فإن انطباعي البصري عن التزامن لن يتطابق مع انطباعك أنت ؟ أو هي تقول في الحقيقة إن مشاهداتي المتزامنة بمجملها هي من وجهة نظرك أنت ، مشاهدات شخص قصير النظر راح يركض بسرعة جنونية من قطعة إلى أخرى لكي يراها . فالإخلال بالزمن إذاً هو الذي أحدث تبديلاً في الشكل بحيث بدا لي السطح المستوي للمحيط وكأنه أصبح مجعداً من الأمواج ، ويظهر وكأن هذه الأمواج تتراكض عليه فعلاً .

وكلمة تتراكض هنا هي التعبير الصحيح ، لأنها تنتقل بسرعة أكبر بكثير من سرعة الضوء .

هل قلنا « بسرعة أكبر من سرعة الضوء » ؟ إن النسبية ستبدي انزعاجها أيضاً من ذلك .

إذاً ما العمل ؟ ولكن لا ، ليس لدرجة الإزعاج ، لأن النسبية لاتعترض إلا إذا انتقلت الطاقة الفعلية بسرعة أكبر من سرعة الضوء . والحقيقة إن العلم عرف منذ زمن طويل هذا النوع من الأمواج التي تنتشر بسرعة أكبر من الضوء ، ولكنها

لايمكن أن تنقل الطاقة بهذه السرعة . وهذه الأمواج ، هي أمواج الطور (كما كانت تدعى فيما مضى) فالأمور تتحسن إذاً .

ولكن ، ثمة طاقة تنتقل مع ذلك ، لأن لدينا الجسيم نفسه الذي ينتقل . والكتلة هي شكل من أشكال الطاقة . فما العلاقة بينها وبين أمواج الطور ؟ لقد اكتشف دوبروي هذه العلاقة .

إذا أخذنا عدداً كبيراً من قطارات أمواج دوبروي التي تجري بسرع تختلف فيما بينها اختلافات طفيفة ، فإن تأثيراتها ستنضاف أو تطرح على طريقة أعطيات أصحابنا المليارديرية المسنين . لنفرض الآن أن هذه الأمواج تنطلق في الاتجاه نفسه وبحيث تكون كلها متفقة في الطور في مكان محدد . إنها ستشكل في البدء موجة هائلة في هذا الموضع ، ولكنها لن تبقى فيه ، إذ برهن دوبروي أنها ستنتقل بمشية وئيدة رزينة ، وبأبطأ كثيراً من سرعة الضوء . والحقيقة أن هذه الموجة المركبة الجليلة ليس فقط ستنتقل ، بل ستنتقل بسرعة الجسيم نفسه . وهذه هي العلاقة الغريبة التي ربطت الجسيم البطيء بالموجة التي تنتقل بجنون .

لقد اكتشف دوبروي علاقات أخرى حميمة بين الجسيمات وبين الأمواج التي ترافقها . من ذلك مثلاً ، أن الرياضي الفرنسي الكبير دي فيرما كان قد اختزل منذ زمن طويل قوانين البصريات الهندسية إلى قاعدة وحيدة لها صفة شمولية تامة . وهذه القاعدة تنص على أن شعاع الضوء يتخذ خط السير الذي يحتاج فيه إلى زمن اقل . كما أن قوانين الديناميك كانت قد اختزلت أيضاً إلى قانون واحد ينص على أن كل منظومة مادية تعمل بحيث تستخدم أقل كمية مما يدعى في لغة العلم بـ « الفعل » . فلدينا إذاً ، من جهة مبدأ الزمن الأقل ، ولدينا من جهة أخرى مبدأ الفعل الأقل .

والآن ، وقد تبين أن ثابت بلانك h هو الواحدة الأساسية لهذا الكيان الذي يدعى « الفعل » ـــ حتى لقد دعي « كم الفعل » ـــ فقد اكتشف دوبروي

أنه يقوم بوظيفة الجسر الذي يربط الموجة بالجسيم ، باعتبار أن مبدأ الزمن الأقل الذي يسري على أمواجه المادية ، يطابق رياضياً مبدأ الفعل الأقل الذي يسري على جسيماته[1] .

أما كيف تعطي فكرة دوبروي صورة مدهشة بوضوحها لقاعدة بوهر التي تحدد كيفية اختيار المسارات المباحة للإلكترونات حول النواة ، فهذا ما سنراه في الفصل القادم .

ولكن الفيزيائي الممتهن ، لديه مشاغل كثيرة . وكل ما يستطيع عمله هو أن يظل على بينة من كل ما يجري حوله من تطورات منتظمة في مجال نشاطه الخاص . فهو لذلك يحذر العقول الخيالية المليئة بالأفكار التي لاقيمة لها والتي تدعي أنها حلت مشاكل العالم ، وما أكثر هذه العقول ؟.. وعمل دوبروي هذا ، ليس سوى عمل خيالي محض رغم تبريراته الوفيرة . ولكنه لم يستطع بعد أن يسجل نصراً مدوياً واحداً له قيمة عملية مماثلة لتلك التي أقامت الدليل على نظرية بوهر بين عشية وضحاها ، ونعني بها وصفته لحساب عدد بالمر العجيب [2] . فأين الدليل التجريبي بالنسبة لدوبروي ؟

ما من شك في أن دوبروي لم يترك موجاته غامضة ، بل عين كل خواصها بدقة ، وأشار إلى أن طول الموجة يجب أن يساوي h مقسومة على كتلة الجسيم وعلى سرعته . ولكن ليس معقولاً أن تفلت هذه الأمواج ، إن كانت موجودة حقاً ، من أعين المجربين طيلة هذه العهود ، على الرغم من أن أحداً لم يشك في أن فكرة دوبروي ، كانت جذابة جداً، ولكنها لم تتعد ذلك الجمال الخيالي ، فهي جميلة رشيقة ، مسلية ، مشوقة ، أنيقة ، عبقرية ، بل مدهشة إلى حد ما ، ولكن هل هذا كله من الفيزياء في شيء ؟ أبداً ، المهم أين الدليل التجريبي .

ولكن ، إذا كان قد وجد إنسان في العالم قادر على توقع اكتشاف دوبروي ، فهذا الإنسان هو أينشتين . لأن فكرة دوبروي تكمل فكرته الخاصة

---

(١) أي أمواج دوبروي وجسيمات دوبروي . (المترجم)

(٢) نذكر أن الدستور الذي اكتشفه بالمر والذي أعاد اكتشافه بوهر بحسب نظريته كان مثبتاً بالتجربة ، أما موجات دوبروي فلايوجد لا في الماضي ولاحتى عند ظهورها ، دليل تجريبي على وجودها الفعلي . (المترجم)

عن الفوتون وتستقي معينها من نظريته النسبية . فأينشتين كان قد برهن أن الضوء الذي ظلت صورته في الأذهان مدة طويلة ، هي صورة موجة ، هو أشبه بجسيم . أما دوبروي ، فقد أتى ليكمل الحلقة باقتراحه : إن المادة التي ظلت تعتبر لزمن طويل مؤلفة من جسيات ، يجب أن تصاحبها أمواج ، وبذلك تصبح مشاركة لهذه الأخيرة بشيء من طبيعتها . وهكذا فهم أينشتين فوراً كل ما يمكن أن تنطوي عليه أعمال دوبروي من أهمية ، وأيّدها بدعم من شهرته الواسعة . ولكن .. أين الدليل التجريبي ؟

في مختبرات شركة بل للتلفونات في نيويورك ، كان س . ج . دافيسون C. J. Davisson يتابع سلسلة من التجارب بدأها عام ١٩٢١ . وأما ما صلة هذه التجارب بالتلفونات ، فهذا ما أجهله ، ولكنها كانت حتماً على صلة مع « تنطيط » سيل من الإلكترونات على قطعة من المعدن . وفي نيسان (إبريل) من عام ١٩٢٥ ، وقع حادث طريف ، فبينما كان دافيسون ومعاونه جيرمر Germer ينططان الإلكترونات على قطعة صغيرة من النيكل ، وفي حاوٍ مفرغ تماماً من الهواء تقريباً ، انفجر دورق يحوي هواء سائلاً في المختبر . وكانت قطعة النيكل [1] آنذاك خاضعة لحرارة عالية جداً . فتعطل الجهاز ، وامتلأ الفراغ ، وفار الهواء السائل فلوث سطح النيكل المحضر بعناية فائقة . وكانت الطريقة الوحيدة لتنظيفه تتطلب تسخينه لمدة طويلة . غير أن دافيسون وجيرمر لم ييأسا لحسن الحظ من هذا الحادث العابر ، بل راحا يصلحان كل ضرر ، وأعادا سطح النيكل إلى ما كان عليه ، ثم تابعا تجربتهما . ولم يفطنا أبداً إلى أن التسخين الشديد كان قد بدل بنية قطعة النيكل تبديلاً جذرياً . إذ أدى إلى تكوين بلورات كبيرة بدلاً من البلورات الوحيدة الصغيرة ، الكثيرة العدد ، التي كانت تؤلف قطعة المعدن . وهكذا كانت قطعة المعدن الداخلية قد تعدلت كثيراً ، ولكن سطح المعدن لم يبدُ عليه أي إشارة تدل على هذا التحول .

(١) عندما ألف هذا الكتاب ، كانت قطعة النقود « النيكل » (النكلة) التي تساوي ٥ سنتيات ، هي ثمن المخابرة في الهاتف العمومي. لذلك علق الكاتب يومها قائلاً : « لاأظن أن هذه الكلمة هي العلاقة التي نبحث عنها بين تجارب دافيسون وبين التلفونات » . وعندما أعيد طبع الكتاب بعد مدة ، لم تعد قطعة النيكل كافية للمخابرة . لذلك علق الكاتب « لم تعد هذه النكتة صالحة الآن في عام ١٩٥٩ ، ولكني أبقيتها ترحماً على الأيام الجملية التي كانت المخابرة فيها تكلف نكلة واحدة » .

تابع دافيسون وجيرمر تجربتهما التي انقطعت دون أن يدور في خلدهما أبداً أن هذه المصادفة كانت لصالحهما . ولكن النتيجة الأولى التي حصلا عليها ، أذهلتهما . فهناك تحت بصرهما ، ارتسمت شبكات نموذجية يعرفها العلماء منذ زمن طويل باسم شبكات انعراج الأشعة السينية . ولكنهما لم يستعملا سوى الإلكترونات ، ولاتوجد أشعة سينية على الإطلاق . وكانت هذه التجارب قد بدأت قبل أن يكشف دوبروي عن نتائجه بسنوات قليلة ، فلولا انفجار دورق الهواء السائل لما وصل دافيسون وجيرمر إلى هذا الاكتشاف المذهل . وهكذا ساقت المصادفة دافيسون لنيل جائزة نوبيل للعام ١٩٣٧ . بينما كان دوبروي قد نالها عام ١٩٢٩ ، وذلك لأن شبكات الانعراج هذه ، الشبيهة بشبكات انعراج الأشعة السينية ، كانت أول برهان تجريبي مباشر على نظرية دوبروي . فكانت تثبت أن الإلكترونات تسلك سلوك الموجات . بل الأجمل من ذلك كله ، هو أنها أثبتت أن الإلكترونات تسلك سلوك الأمواج التي تنبأ بها دوبروي تماماً . إذ دلت القياسات بالفعل على أن أطوال الموجات تطابق تماماً الأطوال التي عينها دوبروي . فالإثبات إذاً ، يقوم الآن على قاعدة كمية واضحة محددة . وكان ذلك برهاناً تجريبياً لايرد .

ولكن هاهما الموجة والجسيم ، هذان الخصمان العنيدان ، في موقف مثير غريب ، فأي أفق مليء بالآمال فتح أمام الموجة ؟ فنحن نذكر أن سلاح الموجة الأساسي الذي تضع فيه كل ثقتها ، والذي أقر لها به الفوتون نفسه بأنه برهان لايرد ، هو أن كل ما يحدث تداخلات هو موجه . وقد سلم الفوتون بذلك مرغماً ، إلا أنه ظل طيلة ذلك الوقت يتباهى بأنه جسيم كأي جسيم آخر — كالإلكترون مثلاً . ولكن هاهو الإلكترون الذي يعد جسيماً بحق ، يتصرف تصرف الموجة .

وإننا لنتساءل : ترى ما الذي كان يمكن للجسيم أن يفكر به لو أنه استطاع أن يتوقع نتيجة من النتائج (العملية) المترتبة على ذلك كله ! فالدقة والوضوح يزدادان في عمل المجهر كلما كان طول موجة الضوء المستعمل أصغر . لذلك تستعمل المجاهر العالية القدرة ، الأشعة فوق البنفسجية . ولما كان طول موجة الإلكترونات المقذوفة بسرعة كبيرة ، هي أصغر بآلاف المرات من طول موجة الأشعة فوق

البنفسجيـة ، لذلك كانت هذه الأشعة تبشر بالكشف عن المزيد من التفاصيل . وقد تحقق هذا الأمل فعلاً فيما بعد ، وبكل مداه ، عند اختراع المجهر الإلكتروني .

فـالموجـة أصبحت أخـيراً ، وبعـد تقهقـرهـا البطيء كل هذه السنـوات ، قـادرة على القيـام بهجـوم معـاكس على كافة الجبهـات : « أنت تقول إنك جسـيم ، أليس كذلك ؟ ولكن لا ، إنك لاتعرف حتى ما هو الجسيم ، لاأنت ولا أفكارك العجيبة الجديدة ؟ وماذا عن صـديقك الإلكترون ؟ لقد قلت إنه جسـيم ؟ فانظر إذاً إلى حاله الآن ، ولو سألتنا عنه لقلنا لك إنه موجة . وأنت أيضاً ، إنك موجة . والحقيقة أننا لم نكف لحظة عن هذا الظن ، ولكنك كنت تتكلم بصوت مرتفع حتى لقد أوشكت أن تثبط من عزيمتنا » . وبعد هذا الخطاب البليغ الذي أفرجت فيه الموجة عن غضبها كله . أصبح بإمكانها أن تسترخي وتتمتع بسعادتها التي استردتها . ولكن ، لن يطول فرحها ، فسرعان ما تعود إليها الوساوس ــ فالضوء نفسه لها بالمرصاد . ترى هل كان هجوم الموجة المعاكس ماحقاً حقاً ؟ إنها لم تكسب الحرب ، بل لم تحارب الفوتون فعلاً في مناطقه الحيوية ، بل قل أين هي من ذلك ؟ إن كل مافعلته هو أنها وسعت جبهة القتال من نظرية الضوء إلى نظرية المادة كلها . والرأي العام طبعاً ، كان يقول أن لاجدال في أن المادة إلى جانب الفوتون ، فكونه الآن يجدها في صميم المعركة ، أمر يدعو للدهشة فعلاً . ولكن قلعة الفوتون لازالت حصينة مع ذلك ، لأن الموجة لم تستطع بعدُ أن تهزم المفعول الضوئي الكهربائي ، كما لم تهزم مسارات الإلكترونات في حجرة ويلسون . وإذا أردنا الحقيقة ، فقد كان هجوم الموجة المعاكس أقرب إلى الفشل . فهي بعد أن دفعت الإلكترون إلى قلب النزاع ، أصبح من الطبيعي أن تنضم مسارات الإلكترونات إلى معسكر الجسيم . أو بمعنى آخر ، حين أعلنت أن خواص الإلكترون التموجية إلى جانبها ، جعلت خواص الإلكترون نفســه ، الجسيميـة ، تنحـاز إلى جانب الفوتون لينظموا معاً مقاومة الجسيمات كلها . وهكذا غرقت الحرب الأهلية في أسوأ حالات اليأس ، ولم يعد هناك بارقة أمل واحده ، في ألا تشارك فيها الفيزياء الأساسية كلها .

غير أن الأحداث كانت تسير بسرعة . فالمفاوضات الدبلوماسية كانت قد

بدأت في الميادين الأخرى ، وما أن مر عام أو أقل حتى وصلت إلى حل هذا النزاع الطويل الأمد موجة ــ جسيم بشكل يرضي الطرفين إلى حد ما .

أما الآن ، فعلينا أن نعود إلى الفترة التي كانت فيها نظرية دوبروي لاتزال فرضية غير محققة تكافح لتنال القبول . وكان دوبروي يعيش حياة قلق في هذه الفترة ، لأن أفكاره ، كما رأينا ، كانت قبل مجيء دافيسون وجيرمر بالدليل على صحتها ، غير معترف بها كلياً من الوجهة الفيزيائية .

٩ ــ التخلي عن لوائح الغسيل

بينما كانت أفكار دوبروي تنتظر الاعتراف بها وإقرارها ، كانت نظرية بوهر الواهنة تستقطب اهتمام الفيزيائيين دائماً . فهؤلاء استمروا يستخدمونها في حساباتهم نظراً لعدم وجود بديل أدق يمكن الاعتماد عليه ، مع أن نتائج هذه الحسابات أخذت تفضح معايبها يوماً بعد يوم .

وكان من حسن حظ العلم أن ظلت أفكار دوبروي مركونة في الجانب الخلفي ، وإلا لما كان الباحثان الشابان ، الهولاندي هـ . أ . كرمرز Kramers والألماني هيزنبرغ قد شرعا في تحضير دراسة مبنية على نظرية بوهر ، ولما اصطدمت حساباتهما فعلاً بنواقص مبدأ التقابل التي أنبتت في ذهن هيزنبرغ أفكاراً أصيلة وعميقة . ولذلك لم تسجل نظرية بوهر من الحسنات خيراً من أنها كشفت لهيزنبرغ عن سر ضعفها ، وبالتالي عن الضعف المتأصل في الفيزياء القديمة . وبذلك ظل أثرها المتسامي خالداً أبداً في تطور العلم الحديث بلاجدال .

وكانت جامعة غوتنجن في ألمانية تضم ، قبل مجيء هتلر بسنوات ، مجموعة من ألمع وأنشط العلماء الذين يعدون إحدى مفاخر ألمانية في الحقل العلمي والرياضي . غير أنهم تفرقوا بعد هتلر في أرجاء المعمورة كلها . وكان منهم ماكس بورن الأستاذ ذا الكرسي ، وفيرنر هيزنبرغ ، العضو الحديث في الكلية ، الذي لم يكد يتجاوز العشرين . وقد بدا اكتشاف هيزنبرغ العظيم عند ظهوره في غاية الغرابة ، بل أغرب حتى من اهتزازات دوبروي المتزامنة . غير أن ماكس بورن استطاع بدافع حسه الغريزي الواثق أن يميز فيه أسس النظرية الجديدة التي كان قد تنبأ بها في الجزء الأول . فما لبثت الفكرة

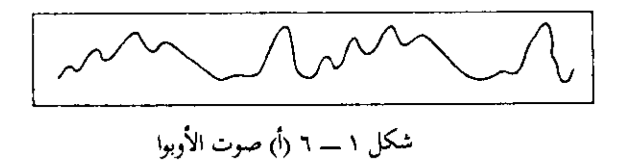
الأولى في هذه النظرية أن انبثقت في عام ١٩٢٥ . وعندئذ صب بورن كل جهوده على تطويرها ، وجند زميله ب . جوردان ليساعده في ذلك ، فكانت النتيجة أن كوفئ بنشر الجزء الثاني في عام ١٩٣٠ بالتعاون مع جوردان .

كانت فكرة هيزنبرغ ، مثل أكثر الأفكار العظيمة ، بسيطة من أساسها . فأصولها ترجع إلى النظريات السابقة ، غير أن إثبات ذلك يتطلب منا مقاربتها بحذر وذلك بأن نتتبع مبدأ بوهر المعروف باسم مبدأ التقابل ، فنسير معه في تطوره التاريخي . غير أن مبدأ التقابل ، إذا حاولنا تتبعه ، فسنضطر للعودة أيضاً إلى ماضٍ أبعد لكي ندرس فصلاً في الرياضيات يعرف باسم تحليلات فورييه ، وهذا بدوره سيحيلنا إلى الدخول في مملكة غريبة لم نتوقعها أبداً ، وهي مملكة الموسيقى ، فلنبدأ إذاً بالموسيقى .

قد نتساءل : كيف يمكن لأخدود أسطوانة الفونوغراف أن يسجل الأصوات الموسيقية على اختلافها ، سواء أكانت صوت ناي عذب أم صداح جوقة موسيقية مشبع بالأنغام ، أم تغريد بلبل ضعيف آت من بعيد ، أم دوي قنبلة ذرية مرعب ، فهي كلها بأسرها حبيسة أخدود حلزوني واحد متموج (يعيدها بحذافيرها متى ما نشاء) ، فكيف يوفق هذا الأخدود البسيط جداً إلى تحقيق هذا النصر السحري ؟

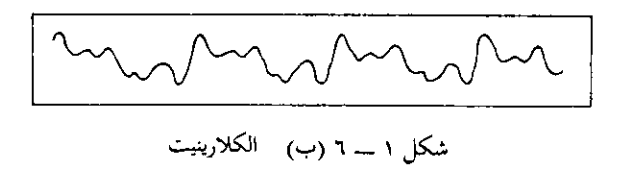
إن كل ما نستطيع قوله ، هو أن بنية سمعنا وطبيعة الصوت التموجية ، يساعدان على تسجيل أعقد الضجيج على شكل أخدود واحد متموج ، ثم إعادة هذا الصوت بأدق تفصيلاته باهتزازات رأس إبرة تسير مع الأخدود دون فكاك .

والشكل ١ـ٦أ هو رسم مبسط لصوت الأوبوا hautbois كما سجله أخدود أسطوانة فونوغراف .



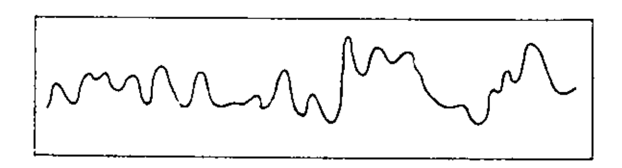
شكل ١ ــ ٦ (أ) صوت الأوبوا

والشكل ١ ـــ ٦ ـــ ب يمثل تسجيلاً لصوت الكلارينيت .



شكل ١ ـــ ٦ (ب) الكلارينيت

وعندما يعزف الأوبوا والكلارينيت معاً يظهر التسجيل على النحو التالي :



١ ـــ ٦ (جـ) الآلتان معاً

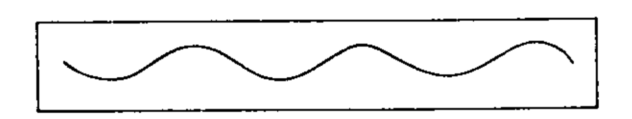
ولما كان الصوت ناجماً عن حركة موجية ، لذلك يمكن رسم الخط ١ــ٦(جـ) من تركيب رسمي الخطين أ ، ب مباشرة بمعنى أن الاهتزازين يتداخلان كما يتداخل تأثير عطاءات المليارديرية . فبمعرفة الخطين أ و ب يصبح من السهل رسم الخط جـ . ولكن إظهار الخطين أ و ب في الخط جـ (أي العودة إلى الوراء) ليس بمثل هذه السهولة . بل إننا لو حاولنا ذلك ، لأمضينا الزمن كله عبثاً ، دون أن نتوصل إلى عزل صوت الأوبوا عن صوت الكلارينيت (ولكن الأذن تستطيع ذلك ، حتى في حال الأوبوا والكلارينيت ، رغم تقاربهما في الرنين والطابع) .

ولو أدرنا الأسطوانة على الفونوغراف ، لوجدنا أن الأذن قد أخذت تميز صوت

كل آلة بمفردها ، والنغمة التي تعزفها ، وشدة صوتها بالنسبة للأخرى ، حتى أنها لتميز ضجيج احتكاك الإبرة بسطح الأسطوانة .

فهذا التحليل معجزة حقيقية من معجزات التكوين . إذ إن الأذن تقوم به ، رغم تعقيده ، بمجرد سماع صوت الاسطوانة ، فهي تنجز فوراً كل العمليات المعقدة التي أدت إلى أن حـ هو مجموع أو ب . ومع ذلك ليس هذا سوى مثال بسيط نسبياً لظاهرة تحليل الأصوات . ويكفي أن نتذكر فقط أعمال التحليل المذهلة التي نقوم بها في كل لحظة من حياتنا دون أن نفكر بذلك . فخليط اهتزازات الهواء المعقد الذي يصل آذاننا ، يتم تفكيكه تلقائياً دون أي جهد يذكر إلى عناصر ليس في مدلولاتها ما هو غريب عنا . فنحن نميز دقات الساعة مثلاً من وشوشة الريح ومن كل ضجيج الحياة المدنية الصاخب أو ضوضاء الناس حولنا . وحتى حين نستمع مستغرقين إلى سمفونية تنساب ألحانها العذبة بجلال وابهة ، فإننا نستطيع أن نتمتع بعزف كل آلة بمفردها في هذه الجوقة ، ونستطيع أن ندرك مع هذا كله ارتعاش ورقة البرنامج في يد جارنا . إنها حقاً مآثر الخلق التي بلغت حد الإعجاز ، ولكن العادة جعلتها مألوفة ومحت كل العجب الذي فيها .

ويستطيع الرياضي أن يحقق على طريقته مآثر مشابهة ، ولكن ليس بمثل هذه السهولة الفائقة ، كما أنه يحلل الاهتزاز الإيقاعي إلى مركبات : كذا للكمان ، وكذا للكلارينيت . فمسائله لاتمت بوجه عام ، بصلة إلى الموسيقى . وهو يفضل استخدام أنماط الاهتزاز الأبسط والأنقى ، أي الأمواج التي تدعى الأمواج الجيبية التي يمت صوتها بصلة لعذوبة الفلوت الساحرة مثلما يمت شكلها للتموج النقي الخالص الذي تحدثه ثنية على سطح ماء هادئ .



شكل ١ ــ ٦ (د) موجة جيبية

إن الموجة الجيبية هي الوحيدة التي لها تواتر واحد ، أما الأمواج الأخرى المنتظمة فيمكن تحليلها إلى موجات جيبية ذات تواترات مختلفة ، وقد أثبت ذلك العالم الفرنسي ج . فورييه منذ ماينوف على مئة عام ، وهو الأساس فيما يسمى « تحليل فورييه » . وهذا التحليل يساعد على القيام بمهارات لايمكن للأذن أن تقوم بها ، كما يساعد على دراسة صوت الكمان وتعيين مركباته . وإذا جعلنا هذه المركبات تصدر أصواتها كلها معاً ، كما نفعل بشكل تقريبي عندما نهز صفائح (أو شوكات رنانة) معاً ، فإنها تتحد لتؤلف صوت الكمان نفسه[1] . وتعين التواترات المنخفضة ارتفاع النغمة ، أما التواترات العالية التي تدعى مدروجات ، فتعطي الصوت رنينه المميز . وتواترات المدروجات ليست وليدة المصادفة ، بل إنها تمثل عددا صحيحاً من المرات من أخفض تواتر . فإذا كان أخفض تواتر هو مئة هزة في الثانية ، فإن تواترات المدروجات ستكون مئتان في الثانية ، ثلاثمئة ، أربعمئة ، إلخ . ولكن ليس من الضروري أن تدخل هذه المدروجات الممكنة كلها في الصوت .

كان تحليل فورييه ، هو الأداة التي استخدمها بوهر في مبدأ التقابل الذي وضعه . فحركة الكوكب مثلاً حول الشمس هي حركة إيقاعية رتيبة ، فإذا طبق عليها تحليل فورييه تعطينا عدداً من التواترات النقية (الجيبية) . وهذا أيضاً شأن إلكترون يتحرك حول نواة إحدى الذرات متبعاً مداره المخصص له . والآن . هناك نقطة يجب إيضاحها ، وهي أن هذه التواترات لاصلة بينها وبين التواترات التي تنشأ عن قفز الإلكترون من مدار إلى آخر ، بل هي شيء مختلف كل الاختلاف . وبحسب نظرية بوهر ، لا أحد يرى أبداً التواترات على المدار نفسه ، وكل ما يراه هو التواترات الموافقة لقفزات الطاقة من مدار إلى آخر . وهذان النوعان من التواتر ، يرتبطان بميدانين مختلفين في الفيزياء ، فالتواتر على المدار يرتبط بالميكانيك التقليدي ، بينما التواتر الآخر هو ما تتوقعه نظرية الكم .

ولكن بوهر شعر أنه يستطيع أن يتوصل من هذا إلى شيء ما ، فكان

(١) يطبق هذا المبدأ الآن في الأورغ الكهربائي ، فنزاه يصدر أصوات آلات مختلفة كالقيثار والكمان والأكورديون إلخ .
(المترجم)

هذا الشيء بالتحديد هو مبدأ التقابل . إذ فكر أنه حتى وإن راحت المسافة الفاصلة بين مدارين مخصصين للإلكترونات تزداد كلما ابتعدا عن النواة ، إلا أن الفرق بين طاقتيهما يتضاءل . فإذا فرضنا أن أحد الإلكترونات قفز من مدار إلى آخر ، وكان المداران كبيرين ، فإن المسافة التي قفزها الإلكترون كبيرة فعلاً ، ولكن الفارق في الطاقة بين المدارين صغير ويكاد يساوي الصفر . وما يهمنا هو فارق الطاقة هذا ، لأنه هو الذي يصدر الضوء الذي نراه في الواقع . ففي حالة المدارات الكبيرة ، حيث تكون قفزات الطاقة معدومة عملياً ، من الجائز أن يكون لميكانيك الكم نوع من الصلة مع الميكانيك التقليدي . وهذا يعني طبعاً أن هناك علاقة بين تواترات قفزات الكم وبين التواترات المدارية التقليدية . وهنا قد يتساءل القارئ ، ــ وهو على حق ــ ما هو المبرر لهذا القول ؟ الحقيقة أن هذه النظرية كان قد وضعها بوهر (أو سمِّها فرضية بوهر) ، وهو صاحب الحق فيها ، يفرضها كما يشاء . ثم إنه كان قد لاحظ علاقة من هذا النوع منذ عام ١٩١٣ ، أي حينما بدأ ببناء نظريته . وفي عام ١٩١٨ ، حضته الظروف لأن يدفع هذه العلاقة إلى أبعد من الحدود الطبيعية ، وأن يطبقها بكل جرأته المعهودة على قفزات الطاقة الكبيرة . وقد أفلح بالحصول على قواعد يمكن استعمالها في حساب شدة التواتر ومقادير أخرى كان افتقار نظريته إليها في السابق هو سبب تخلفها الجدي . ولكن الشيء المزعج هو أن التواترات التقليدية تغدو غير مترابطة مع التواترات الكمومية في حالة قفزات الطاقة الكبيرة . وهذه حقيقة صارخة كان لابد أن ينكشف مدلولها الحاسم كما سنرى فيما بعد . غير أن بوهر رتب أموره رغم كل ذلك لكي يقيم بين هذين التواترين نوعاً من الرابطة ، ثم أمكنه عن طريق هذه الرابطة ، أن يأخذ النتائج التقليدية المتعلقة بالشدات والأمور الأخرى وأن يكسو بها التواترات الكمومية التي تسمى المقابلة . فكانت هذه الرابطة باختصار هي مبدأ التقابل الشهير الذي وضعه بوهر ، وهي فعلاً رابطة ذكية تدل على حسن تدبير أو حيلة بارعة ، قامت بوظيفتها خير قيام ، بل قل كانت مدهشة ، ولكنها لم تخدع أحداً ، إذ لم تتعد كونها ستاراً موقتاً لسد الخرق . لقد كانت تفتقر إلى الدقة والوضوح عند التعبير عنها بشكل رياضي ، ولو أن إحدى التجارب اضطرتنا لأن نفهمها على نحو معين ، فسنجد بعد قليل أن هناك تجربة أخرى تضطرنا لأن نفهمها على نحو

آخر .. وهكذا كان هذا التزاوج المختلط ، الذي نصفه كمومي ونصفه تقليدي ، مصدراً لارتباك خطير دائم ، وغدا تعلقه العاطفي بالنظرية الكلاسيكية حطاً من قدره غير مناسب أبداً ، فكان في حقيقته اعترافاً بالفشل لاأكثر ـــ أو هذا على الأقل ما كان يظن فيه في ذلك الوقت .

وهنا دخل هيزنبرغ في الصورة . فحركة الجسيم ، أي جسيم كان ، يمكن تحديد هويتها تماماً بنوعين من الكميات يشار إليهما بالحرفين p و q . وهاتان الكميتان ليستا غريبتين عنا ، فقد صادفناهما في القاعدة التي تساعد على فرز مدارات بوهر ، حيث q تعني وضع الجسيم ، و p كمية حركته (اندفاعه) ، أي جداء كتلته في سرعته . فطول موجة دوبروي مثلاً يساوي حاصل قسمة h على p (راجع الفصل السابق . ولاننسَ الدستور الجميل $\oint pdq = nh$) .

وبحسب طريقة فورييه يمكن تحليل هاتين الكميتين p و q واستنتاج الموجات الجيبية البسيطة التي تكونها . فبحسب مبدأ التقابل هناك صلة ترابط بين هذه الموجات وبين مدارات ذرة بوهر[1] . ولكن هيزنبرغ وجد في أثناء عمله مع كرمرز أن من المفيد ترتيب تواترات p و q في جدول ، فكان لهذه الجدولة فضل في أنها أوحت له باقتراح عجيب ، لأن هذا الجدول كان مربعاً .

وقد تبدو هذه الجدولة تافهة لامعنى لها ، ولكن نرجو الانتظار ريثما نتبين إلى أين قادت هيزنبرغ وأتباعه .

لنأخذ الكميتين p و q اللتين تصفان حركة الإلكترون . فبعد أن نحصل على الأمواج الجيبية التي تكونهما ، يصبح بإمكاننا تنظيم لائحة « كلائحة الغسيل » تضم كل ما يمكن أن يكونهما فعلاً من تواترات . وهكذا سنقول إن في هذه الـ q أو تلك ، كذا من هذا المقدار الثابت أولاً (أي الذي تواتره صفر) ، ثم كذا من هذا

---

(١) قد يساعد تذكر مبدأ التقابل على إيضاح المقصود : « يمكن أن ننظر إلى إمكانية انتقال خاص (من مدار إلى مدار) ، على أنها راجعة إلى وجود مركبة (أو بالأحرى حد من حدود سلسلة فورييه) لحركة الإلكترون الاهتزازية ، هي حركة اهتزازية بسيطة تقابل هذا الانتقال » . (م . م)

التواتر وكذا من ذاك ، وكذا من هذا الآخر إلخ . على أن نبدأ دائماً من التواتر الأساسي لكي نمر بعدئذ على لائحة المدروجات غير المنتهية .

مغسل q		مغسل « أبو زياد »	
التواتر	**الكمية**	**الفقرة**	**الكمية**
ثابت (أي صفر في الثانية)	٤	منديل	٤
١٠٠٠ في الثانية	٨	جوارب	٨
٢٠٠٠ في الثانية	٥	قمصان	٥
٣٠٠٠ في الثانية	٢	منشفة	٢
٤٠٠٠ في الثانية	صفر	أثواب	صفر
٥٠٠٠ في الثانية	١	قمصان للنوم	١
٦٠٠٠ في الثانية	٢	أغطية سرير	٢
إلخ	إلخ	إلخ	إلخ

جدول ــ ١

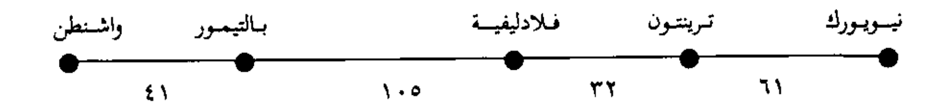
لاشك أن هذا التنظيم ظريف (ولولا أنه كذلك لما استعملته محلات التنظيف التجارية) . فبواسطته نرى بلمحة واحدة التركيب الصحيح لكل p وكل q . ولذلك ينتشي الرياضيون دائماً عندما يتمكنون من تنظيم معطياتهم بطريقة مماثلة لهذه .

غير أن هيزنبرغ لم يكن راضياً عن هذا التنظيم،لأنه فهم بوضوح أن هذا التنظيم الصالح للميكانيك الكلاسيكي ، لايمكن أن يكون كذلك لميكانيك الكم . فالعلاقات بين تواترات فورييه ، في الحقيقة ، لاتتفق مع العلاقات الموجودة بين تواترات الأطياف الذرية .

ولكي يعيد هيزنبرغ البناء من جديد ، انطلق من ملاحظة كان قد تنبه إليها

سلفاً وهي أن تواترات سلالم بالمر ـــ ريتز لايمكن أن تصنف في الحالة الطبيعية على غرار لوائح الغسيل .

وهذا أمر يعلمه ، ويعلم سببه كل من نشر خرائط للطرق . وإليكم جانباً من خارطة الطرق تمثل جزءاً من الطريق USI (في الولايات المتحدة) . هناك خمسة مدن على هذه الطريق ، وأرقام تشير إلى المسافات التي تفصل بينها .



على الرغم من أن هذه المدن واقعة على طريق واحدة ، إلا أن طريقة تصنيف المسافات بينها هي كما يلي :

	بالتيمور	ترينتون	فلادليفية	نيويورك	واشنطن
بالتيمور	صفر	١٣٧	١٠٥	١٩٨	٤١
تيرنتون	١٣٧	صفر	٣٢	٦١	١٧٨
فلادليفية	١٠٥	٣٢	صفر	٩٣	١٤٩
نيويورك	١٩٨	٦١	٩٣	صفر	٢٣٩
واشنطن	٤١	١٧٨	١٤٦	٢٣٩	صفر

جدول ـــ ٢

إن هذا الجزء من الطريق USI هو على الخارطة خط ، ولكنه على شكل مربع عندما ينظم في جدول للمسافات . وأحياناً تكتفي الخرائط بإعطاء الجزء السفلي من الجدول (أي نصف الجدول السفلي الواقع تحت قطر الأصفار لأنه مناظر للنصف الآخر) . ولكن هذا التفصيل ثانوي ، وما يهمنا هو أن الطريق لايمكن أن ترتب المسافات عليها وفق عمود واحد على غرار قوائم الغسيل .

ترى لمــاذا يتمسك صـــانع الخرائط بهذا المـربع (أو هذا المثلث) ؟ هل لأن هذين الشكلين بالتحديد يرضيان حسه الجمالي ؟ أم ترى لأن المربع والمثلث لهما عنده معنى عميق ساحر في علم التنجيم والأرقام ؟ الحقيقة أن هذه كلها اعتبارات ثانوية . والسبب الرئيسي في هذا النمط من التصنيف هو أن المعطيات المراد تصنيفها تحتاجه عن حق . فبـالنسبـة للائحة الغسيل مثلاً لاأحد يفكر في أن يجعلها مربعه ، وهي عمودية قطعاً .

أو تعـالوا نأخذ مثـلاً عدد محطـات الخدمة التي تزرع على مختـلف قطاعات الطـريق USI . إننـا نستطيع وضـعهـا في جدول مربع كجـدول المسـافـات . بـل يمكن أن ندمج الجدولين في جدول واحد لكي نعطي المـلاحظات المتعـلقـة بالمسـافة والملاحظات المتعلقة بالمحروقات . وأفضل من هذا أيضاً هو أن نصمم جدولاً مربعاً نضمنه عدد محطات الخدمة التي على يمين الطريق في حالة الذهاب ، ثم في حالة الإياب ، وعندئذ يفقد الجدول المربع تناظره انظر مثلاً الجدول التالي : جدول المسافات ومحطات الخدمة

	بالتيمور	نيويورك	إلخ
بالتيمور	٢٥٠ محطة خدمة في بالتيمور	٣٨٠ محطة خدمة على يمين الطريق ، وعلى طول ١٩٨ ميلاً من بالتيمور إلى نيويورك	إلخ
نيويورك	٤٢٠ محطة خدمة على يمين الطريق ،وعلى طول ١٩٨ ميلاً من نيويورك إلى بالتيمور	٥٢٥ محطة خدمة في نيويورك	إلخ
إلخ	إلخ	إلخ	إلخ

ففي حالتنا هذه ، لم يعد أمامنا سوى خطوة واحدة لكي ننتقل من واضع جداول الطرق إلى الفيزيائي . فهذا الأخير ، يود أن يصنف معطياته المتعلقة بالتواترات المتضمنة في سلم بالمر ـــ ريتز المتدرج . فلكي يتضح الشبه كاملاً ، دعونا نمثل سلم تواترات الهيدورجين على نمط خارطة لأحد الطرق . (انظر الشكل التالي) .

١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ إلخ

الدرجات

خارطة طريق = سلم بالمر

إن الانتقال بين الدرجات يقابله الانتقال بين المدن . وأما سعات مختلف التواترات فيمكن أن تصنف بالطريقة نفسها التي رأيناها في جدول محطات الخدمة السابق . فالسائق قد يخطر له أن ينتقل مثلاً من ترينيتون إلى بالتيمور . أما الإلكترون بالمقابل ، فقد يقفز من الدرجة الثالثة إلى الخامسة أو إلى العاشرة أو الثامنة . والفارق الرئيسي بين الحالتين هو أن لدينا هنا (في حالة الإلكترونات) عدداً لانهاية له من الأماكن على الخارطة بدلاً من خمسة . لذلك يجب تصنيف المعطيات في جدول مربع لانهائي (أي مصفوفة مربعة رتبتها لانهائية) .

وهنا يقول هيزنبرغ : هناك ذرات لانعرف عنها شيئاً ، وهناك أخرى لا نعرف عنها إلا علامات الصنع المميزة لكل منها بالترتيب ، أي تواترات وشدات الضوء الذي تصدره (أو الطيف) . أما مدارات الإلكترونات فما من إنسان رآها . وهي في الحقيقة تنتمي إلى عالم الخيال البحت . لذلك يجب أن يهجر من أصبح في سننا جميع هذه التخيلات الصبيانية التي ضللتنا (أي المدارات) في أحكامنا ، في هذه النظرية التي أصبحت في مقدمة نظريات الفيزياء .

وبعد ، ما الذي بقي لنا ؟ بأي المواد سنبني نظريتنا وبأي شيء سنبني كوناً أكثر صحة ؟

هذا ما سنوضحه : علينا أن نبنيه بالمواد المعروفة وحدها ، بأشياء محددة تماماً ، كوجود سلالم بالمر — ريتز المدرجة في الذرات . فالكمية p مثلاً ، التي سبق أن قلنا إنها جداء الكتلة في السرعة ، يجب أن تعطى قيمها الآن في جدول مربع الشكل لانهاية له . وهذا ينطبق أيضاً على q التي تدل على وضع الجسيم . بل إن كمياتنا الذرية كلها يجب أن تمثل في الحقيقة بهذا الشكل .

وهذه مهمة خارقة ، فلنر ماذا تعني حقاً : إنها تعني ، قبل كل

شيء ، أنه لم يعد ممكناً حشر تواترات معينة مسبقاً في عالم الذرة . حقاً إنه يمكن ترقيم الدرجات : درجة أولى ، درجة ثانية ، درجة ثالثة وهكذا دواليك ، ولكن لايمكن أبداً أن نزعم سلفاً أن لها توترات محددة . فالنظرية ذاتها هي التي يجب أن تُنتج التواترات والشدات الصحيحة لكل وضع خاص . وهذا بالضبط مطلب هيزنبرغ المتشدد الذي صمم عليه . وكان على كل حال مطلباً عادلاً لايقبل النقاش . ولكن ما قولنا بهذه الهشاشة المبدئية التي تغلف الخطة كلها بهالة سحرية ؟ فقبل هيزنبرغ ، كان يمكن حتماً تفريق الكميتين p و q في لوائح (كلوائح الغسيـل) . على طريقة فوربيه . ولكن الرجوع إلى p وq من هذه اللوائح ، كان ممكناً دائماً . فهذه اللوائح أخذت قيمها أصلاً من p و q . أما الآن فلا شيء ينبئنـا ما الذي يمكن أن تكونه الـ p والـ q . فنحن لانعرف عنهـا سوى هذه الجداول المربعة ، وهي وحدها التي تمثل الـ p والـ q ، وما من قوة في العالم يمكن أن تعيد لها بساطتها السابقة . فأي عالم هذا الذي سنراه ينبعث وفيه مثل هذه الـ p والـ q القبيحتين اللتين تمثلان اندفاعات الجسيمات وأوضاعها في المكان ؟ فالمكان والحركة لن يعودا حتماً على ما كانا عليه سابقاً . ومع ذلك ، لايمكن أن يكون نفي قانون بالمر ـــ ريتز مجال بحث أبداً . ولكن هيزنبرغ كان مايزال شاباً في الثالثة والعشرين من عمره ، ولاتنقصه جرأة الإقدام .

وهكـذا استبعد لوائح الغسيـل ، لأن p ، أوq ، لايمكن أبداً أن تُعطيـا على الشكل العادي المبين في الجدول التالي ، بل يجب أن تعطيا كما في الجدول الذي سيليه :

q

اسم المركبة	الكمية
الثابتة	٤ وحدات سعة بتواتر صفر
التواتر الأساسي	١١ وحدة سعة بتواتر ١٠٠٠ في الثانية
المدروج الأول	٦ وحدات سعة بتواتر ٢٠٠٠ في الثانية
المدروج الثاني	١ وحدة سعة واحدة بتواتر ٣٠٠٠ في الثانية
المدروج الثالث	٢ وحدتا سعة بتواتر ٤٠٠٠ في الثانية
المدروج الرابع	صفر وحدة سعة بتواتر ٥٠٠٠ في الثانية
إلخ	إلخ

وبدلاً من الجدول أعلاه ، يجب أن يكون الجدول الآن ذا شكل غريب ومربع كما في التالي :

q

رقم الدرجة على السلم	الدرجة الأولى	الدرجة الثانية	الدرجة الثالثة	إلخ
الدرجة الأولى	٣ وحدات سعة عائدة للدرجة الأولى وحدها	١٣ وحدة سعة للتواتر المميز لقفزة من الدرجة الأولى للثانية	١ وحدة سعة للتواتر المميز لقفزة من الدرجة الأولى إلى الثالثة	إلخ
الدرجة الثانية	٨ وحدات سعة للتواتر المميز لقفزة من الدرجة الثانية إلى الأولى	صفر وحدة سعة للدرجة الثانية بمفردها	صفر وحدة سعة للتواتر المميز لقفزة من الدرجة الثانية إلى الثالثة	إلخ
الدرجة الثالثة	٥ وحدات سعة للتواتر المميز لقفزة من الدرجة الثالثة إلى الأولى	٢ وحدة سعة للتواتر المميز لقفزة من الدرجة الثالثة إلى الثانية	٤ وحدات سعة للتواتر المميز للدرجة الثالثة وحدها	إلخ
إلخ	إلخ	إلخ	إلخ	

وإذا أخذنا كمية أخرى ولتكن p مثلاً ، المختلفة عن q سيكون لها نفس التواترات تماماً ولكن سعاتها مختلفة . فإذا اعتبرنا q هي المقابل لجدول محطات الخدمة ، فإن p ستقابل جدولاً مماثلاً ولكنه سيحوي إرشادات أخرى ، كأن تكون حول المطاعم مثلاً في جزء الطريق نفسه .

وقد ارتضى هيزنبرغ لنفسه أن يحمل معه هذه « الخرداوات » من الكميات p وq التي تحولت إلى قطع تقرقع في نعوشها المربعة وكأنها أجزاء هيكل عظمي ــ أو هذا ما تبين أنها أصبحت عليه فعلاً . فأي شخص آخر غيره ، أقل شجاعة ، كان سيتراجع من الذعر . وهل يمكن لهذه القوالب التي تصعب معالجتها ، أو قل هذه الوحوش المخيفة ، أن تكون مواد بناء الكون ؟ أبهذا ستبنى الطبيعة وهي التي كانت تظهر دائماً بسيطة في نهاية التحليل .

ولكن منطق التجربة الذي لايقبل الجدل ، كان يقف أمام هيزنبرغ بكل حقيقة التجربة الناصعة . فكان لابد لهذا الأخير من أن يتبعه حيثما ذهب به . وإذا كان قد وجد نفسه الآن بعيداً عن الشواطئ المحببة في الرياضيات الأليفة ، فهو الذي ذهب ، على كل حال ، بإرادته طائعاً إلى منفاه . فحين لم يشأ التراجع إلى الخلف ، وجد أنه لم يبقَ أمامه إلا أن يواصل السير إلى أمام متجهاً إلى الأفق البعيد ، حيث لاشيء سوى الظلمة ، ولاحتى نجم واحد يهتدي به في مغامرته العظيمة . بل كل ما كان هنالك ، ضياء شاحب آت من الشاطئ ، يبتعد عنه بسرعة كبيرة ، وعدة منارات خافتة أضاءها بوهر وأمثاله ، فاهتدى بها ليتابع مسيرته ، وراح بعيداً جداً رافضاً دفء اليابسة ونعيمها . ولكن هذه اليابسة ، هي التي أنارت سبيله في النهاية ، ولم يستطع الخلاص منها ، لافي عسرته ولافي يسرته ، فهي وطنه الأم ، وهي جزء من ميراثه العلمي ، فلا يمكنه أن يتخلى عنها ولاأن ينساها . فالعالم الجديد الذي كان يحلم به ويسعى إليه ، كان لابد أن يكون مصاغاً على هذه الصورة ، وأن يظهر فعلاً في الاتجاه الذي أشارت إليه .

فمن الكميتين p وq القديمتين ، كانت قد صيغت معادلات قوية معبرة ذات شأن كبير . وكان الهدف منها دفع الاكتشافات إلى مدى أبعد . فكانت هذه المعادلات على جانب كبير من الصحة ، فهل يحتمل أن يتمكن هيزنبرغ من أن يعيد تشكيلها كاملة من جداوله الصعبة المعالجة ، مع احتفاظه بشكلها الخارجي ؟

كانت هاتان الكميتان p وq مضروبتين الواحدة منهما في الأخرى في

المعادلات القديمة . لذلك ولكي يعيد هيزنبرغ تشكيل هذه المعادلات ، كان لابد له من أن يبحث عن طريقة ضرب الجدولين المربعين الخاصين بـ p و q . فلو توصل إلى حل هذه المسألة الحاسمة فقط ، لأصبح بإمكانه إعادة تشكيل معادلات النظريات القديمة نفسها ، لأن هذه المعادلات مجدية فعلاً ، وهي ستتضمن الآن عنصراً جديداً وغريباً لاتزال قدرته غير مكتشفة (وهو هذه المصفوفات) .

ولكن كيف يجب أن نعمل لكي نضرب جدولين مربعين ؟

لابأس ، دعونا نتساءل : ما معنى ضرب p في q في النظريات القديمة ، ألم يكن يعني ضمناً ضرب قائمتي الغسيل الخاصتين بهما إحداهما في الأخرى ؟ ولنفرض إذاً أننا قمنا بتحليل p و q بطريقة فورييه ، أفلا نستطيع أن نعتبر اللائحة المتعلقة بالفئة الثالثة (الجداء) هي ناتج ضرب القائمتين الخاصتين بـ p و q الأصليتين : وهذا الأمر ، ليس طبيعياً ومألوفاً فحسب ، بل إنه كثيراً ما يستعمل في الرياضيات . والقاعدة التي نتوصل إليها لإجراء ضرب اللوائح قد تبدو غريبة نوعاً ما . ولكن إذا كنا نجد في القواعد التي سنتحدث عنها غرابة ، فما قولنا بالقاعدة الشهيرة التي نطبقها لجمع الكسور ، والتي نجريها ونعالجها بكثير من الليونة واليسر ؟

دعونا ننظر لبرهة في العملية التي نجريها لجمع الكسرين $\frac{٢}{١٣}$ و $\frac{٣}{٧}$ ، سنضرب ١٣ في ٧ في بادئ الأمر لكي نحصل على المقام المشترك ٩١ . ولا شيء غريب في هذه النقطة ، وإن كان علينا إجراء عملية ضرب للحصول على عملية جمع . ولكن المرحلة التالية أعقد من ذلك ، فلكي نحسب البسط ، علينا أن نقوم بطقوس معقدة ، فنضرب ٢ في ٧ ، و٣ في ١٣ لكي نجمع الناتجين ١٤ و٣٩ فيكون البسط ١٤ + ٣٩ = ٥٣ وأخيراً نضع المقام تحت البسط فنحصل على النتيجة $\frac{٥٣}{٩١}$. وهنا يتضح أنه إذا كان المرء قادراً على تطبيق قاعدة بهذا التعقيد لمجرد جمع كسرين في الحساب ، فسيصعب عليه التعلل بمدى التعقيد الظاهر في ضرب لوائح الغسيل في الرياضيات العالية . أو في جداء جداول هيزنبرغ المربعة في الفيزياء الكمومية .

وقد اهتدى هيزنبرغ مثلاً إلى قاعدة مقبولة ترتبط بصلة قوية مع قاعدة ضرب لوائح الغسيل . والمثال البسيط التالي سيرينا آلية هذه العمليات . ولكننا لن نلجأ إلى جداول هيزنبرغ الهائلة ، بل سنستخدم جداول أصغر منها ، فلاتحوي إلا أربع « خانات » نسجل فيها السعات فقط . فالكميتان p و q ستعطيان على النحو :

p ←

الدرجة	١	٢
١	٢	٤
٢	٦	٨

q ←

الدرجة	١	٢
١	١	٣
٢	٥	٧

وجداؤهما يجب أن يدوَّن في جدول من الشكل نفسه :

الدرجة	١	٢
١	؟	؟
٢	؟	؟

ولكن ما العدد الذي يجب أن يكتب في كل خانة ؟ لابأس ، لنفرض أننا ضربنا ٦ من الجدول الأول في ٣ من الجدول الثاني ، فأين مكان هذا الجداء ١٨ ؟ هنا نلاحظ أن ٦ هي قيمة مرتبطة بالقفزة من الدرجة ٢ إلى الدرجة ١ ، و٣ هي قيمة مرتبطة بالقفزة من الدرجة ١ إلى الدرجة ٢ ، فالجداء ١٨ مرتبط في النهاية بقفزة من الدرجة ٢ إلى الدرجة ٢ مروراً بالدرجة ١ . فهذه القفزة تبدأ من ٢ وتنتهي في ٢ فيجب أن توضع في الخانة السفلي إلى اليسار . ولكن هل هذا هو العدد الوحيد الذي يجب أن نسجله في هذه الخانة ؟ لكي نستطلع الأمر ، نبحث عن القفزات الممكنة المركبة من قفزتين ، والتي أولاها في جدول p

وثانيتها في جدول q ، والتي تكون نتيجتها قفزة من الدرجة ٢ إلى الدرجة ٢ ، وسنجد أن ٨ x ٧ = ٥٦ مرتبطة بقفزة من ٢ إلى ٢ (في جدول p) تتبعها قفزة مماثلة من ٢ إلى ٢ أيضاً (في جدول q) ، وهذا كل شيء . فلايوجد في الخانة السفلى إلى اليسار سوى العددين ١٨ و٥٦ ، فالمجموع الكلي في هذه الخانة هو ١٨ + ٥٦ = ٧٤ .

وأيضاً ، ما الذي سنضعه في الخانة الثانية من السطر الأول ؟ إنه طبعاً عدد مرتبط بالقفزة المركبة التي تبدأ بالدرجة ١ وتنتهي بالدرجة ٢ . ونرى أن ٢ x ٣ تحقق هذا الغرض ، لأنها مرتبطة بقفزة من ١ إلى ١ تتلوها قفزة من ١ إلى ٢ . ونرى كذلك أن ٤ x ٧ تحقق الغرض (من ١ إلى ٢ في جدول p ، ومن ٢ إلى ٢ في جدول q) . فالعدد الذي يدون في هذه الخانة هو ٦ + ٢٨ = ٣٤ .

فإذا تابعنا العمل على هذا النحو ، نحصل على الجدول :

الدرجة	١	٢
١	٢٢	٣٤
٢	٤٦	٧٤

← q.p

والآن لنجرب آن نبادل بين موضعي المضروبين p وq ، لكي نرى ماذا يحدث لاأكثر . وهذا طبعاً عمل رتيب بعد أن أنجزنا q×p منذ قليل ، فضلاً عن أنه تمرين جيد . فلنستعد إذاً كتابة p وq اللتين كتبناهما منذ قليل :

الدرجة	١	٢
١	١	٣
٢	٥	٧

← q

الدرجة	١	٢
١	٢	٤
٢	٦	٨

← p

ما الذي سنكتبه في الخانة العليا إلى اليمين في جدول p.q ؟ إنه ١ x ٢ و٣ x ٦ . وهذا طبعاً يعطي في النتيجة ٢٠ .

ولكن ما الذي يجري هنا ؟ منذ قليل كان المجموع الكلي في هذه الخانة نفسها ٢٢ . فلابد أن هناك خطأً في مكان ما . لنتحقق الأمر . ولكن لا ، إنه فعلاً ٢٠ ، فهل العدد الذي كتبناه في المرة الأولى (أي عند حساب q.p) كان خطأً ؟ لا ، إنه صحيح : ٢ × ١ زائد ٤ × ٥ يعطي بلا شك ٢٢ . فلنجرب الخانة العليا إلى اليسار . سنجد أن لدينا هناك ١ × ٤ زائد ٣ × ٨ ، وهذا يعطي ٢٨ . وهذه النتيجة تختلف أيضاً عن سابقتها ، فأي وضع رهيب هذا ، إنه يعني شيئاً واحداً بلاريب ، وهو أن **قاعدة الضرب التي وضعها هيزنبرغ تجعل q×p مختلفاً عن p×q** .

إن هذه النتيجة بلا ريب كان يمكن أن تجعل أكبر الآمال عند هيزنبرغ سخفاً ومهزلة . ولو أن رجلاً غيره أقل عزيمة وأقل عمقاً في إلهامه ورأى ما رآه ، لتخلى دون شك عن أبحاثه أمام مكتشفات على مثل هذا السخف والمهزلة .

وهنا شعر مسافرنا بعزلته وبأن التعب والإعياء قد نالا منه ، وأنه بحاجة ملحة لسماع أنباء بلده ، فقد أضناه هذا السفر المنهك في بحار المستقبل المجهول بلا رفيق ولا أنيس . لذلك هرع يطلب حداً لمتاعبه ، فلعله يجد العون عند أهل الخبرة من الملاحين . ولكنه شعر بأن عليه ، قبل كل شيء ، أن يسبر عمق اكتشافه ، فلربما أخطأ في موضع ما . لذلك ، سرعان ما أجرى بعض الحسابات الأولية ليرى ما نوع النتائج التي ستسفر عنها . وهنا اكتشف ما يبشره بنجاح أكيد . فبعض العلماء ، كانوا قد استدلوا منذ أمد طويل ، ومن نتائج تجارب عديدة ، أنه يستحيل تجريد أي جسيم مهتز ، شبيه بجسيمات بلانك الهزازة ، من كامل طاقته ، أو جعله بالأحرى ساكناً بلا حراك ، بل لابد أن يظل نصف كم من الطاقة مسجوناً لديه إلى الأبد (غير كتلته طبعاً) . ولكن هذه الحقيقة ، لم تكن قد لاقت حتى ذلك الحين ، اي تفسير نظري ، بل كانت حقيقة تعسفية من حقائق الطبيعة ، أو حقيقة كانت دائماً خارج نطاق البنية النظرية الأساسية

للفيزياء . أما الآن ، فها هو هيزنبرغ يكتشف بعد حساباته السريعة ، أن نصف الكم الأساسي ، ينتج تلقائياً من نظريته الجديدة ، وأن تغيرات الطاقة أيضاً لابد أن تقاس بكمومات تامة ، أي مثلما كان معروفاً من قبل . فهذه النتائج إذاً ، تبشر بالنجاح ، وهي خير دليل على صدق إلهام هيزنبرغ . لذلك ، استحق عليها في العام ١٩٣٢ جائزة نوبيل للفيزياء : غير أن هذه الأحداث كلها ، لم تكن قد تجاوزت في تاريخها تموز (يوليو) ١٩٢٥ . فقصتنا إذاً لم تنته بعد .

لقد عاد هيزنبرغ إذاً من مغامرته العلمية ، وهمّ بأن يروي قصته . فلنتخيله وهو على وشك أن يروي لمستمعيه المتلهفين ، كم بدت له أفكاره الخاصة غريبة : لاريب في أنه عندما راح يتصور كيف سيعرض قاعدته لضرب الجداول المربعة ، وأن $q\times p$ لايساوي $p\times q$ ، كان قد تساءل كيف سيستقبل مستمعوه هذه الحقيقة العجيبة .

ولكن هذا النوع من الضرب كان قد اكتشف في حقيقة الأمر ، قبل ذلك التاريخ بما يقرب من نصف قرن في الرياضيات . فكان هذا الاتفاق بين مسيرتي الرياضيات والفيزياء مثالاً من أمثلة كثيرة تم فيها هذه المصادفة وكأنها جزء من خطة مرسومة (إذ يقع حدث وكأنه تحضير لآخر سيليه بعد فترة وجيزة) . ولذلك لفت بورن انتباه هيزنبرغ إلى أن الرياضي الإنجليزي كايلي ، كان قد درس في عام ١٨٥٨ بعض النواحي الهندسية ، وابتدع طريقة حسابية غريبة سماها حساب المصفوفات . ولم تكن هذه المصفوفات سوى جداول مربعة (مشابهة لجداول هيزنبرغ) التي تضم أعداداً تخضع لقواعد رياضية معينة . فعندما نظم هيزنبرغ جداوله المربعة وألف قواعده الخاصة لمعالجتها ، لم يكن ، في الحقيقة ، قد فعل شيئاً سوى أنه أعاد اكتشاف حساب المصفوفات دون أن يدري بذلك . وهذا اتفاق أبعد من أن يحلم به إنسان ، إذ كيف قدر لهذه المفاهيم أن ترسم الطريق إلى الفيزياء الذرية بهذه المصادفة الغريبة ؟ إن ثوريته ، حقاً ، بلغت ذروة الثورية .

وليست هذه الحادثة فريدة في التاريخ ، ولاحتى في قصتنا كما سنرى .

فكثيراً ما هيأ الرياضيون بدافع غريزي مبهم ، ما سيحتاجه علم المستقبل القريب من الرياضيات . وأشهر حوادث هذا السبق (أو التسليف) ما وقع خارج قصتنا ، وفي النظرية النسبية تحديداً ، فعندما حانت اللحظة المناسبة كان الحساب التنسوري الذي ابتدعه الرياضي الإيطالي م . م . ج . ريكشي Ricci أداة جاهزة احتاجها أينشتين لتطوير نظريته النسبوية العامة عن الثقالة .

وعلى الرغم من أن هيزنبرغ غذى حسابه بمادة النظرية الذرية نفسها ، إلا أن هذا الحساب لم يكن قد أصبح بعد نظرية عن الذرة ، بل كان بمعنى ما أقرب لأن يكون فلسفة علمية جديدة . ولكن هذا الأمر لم يتضح إلا فيما بعد ، فكان حتى تلك اللحظة حساباً بحق ، وإلى جانبه إرشاد حول طريقة استخدامه . فراح بورن وجوردان يستخرجان منه نظرية جديدة للذرة ، بل وأكثر من ذلك ، علماً جديداً للميكانيك هو الميكانيك المصفوفي . فإذا لم يكن $q \times p$ مساوياً لـ $p \times q$ ، فلابد عندئذ من إيجاد الفرق بينهما ومما يتألف . ولم تكن الأفكار المصفوفية الجديدة متمشية مع نظرية بوهر . ولكن أين يمكن لبورن وجوردان أن يبحثا عن مصدر آخر للوحي ؟ إذ لم يكن بين أيديهما نظرية أخرى . وكان مبدأ التقابل يشكل جسراً ممتداً فوق الهاوية التي تفصل بين ذرة بوهر ، وبين ميكانيك نيوتن الكلاسيكي . فلابد لهذا المبدأ الآن أن يضع هاتين النظريتين في متناول المصفوفات . وكانت الرابطة هشة رقيقة ، ولكن لم يتوافر بعد شيء أكثر إيحاءً ، فاكتشف بورن وجوردان في هذا المبدأ (مبدأ التقابل) المفتاح الذي يبحثان عنه ، وتوصلا منه في النهاية ، وعن طريق استخدام المعادلة القديمة $\oint pdq = nh$ إلى المعادلة التالية التي تتمتع بقدرة التنبؤ بالغيب

$$pxq - qxp = \frac{h}{2\pi\sqrt{-1}}$$

إن الدهشة التي ستصيبنا عند قراءة هذه المعادلة ، تفوق تلك التي أصابتنا

عندما اكتشفنا لأول مرة أن هناك فرقاً بين $p\times q$ و$q\times p$. فهي تنبئنا بأن الفرق بينهما يساوي ثابت بلانك h مقسوماً على ضعفي جداء π في الجذر التربيعي للعدد الجبري ناقص واحد . ونعلم أن الجذر التربيعي للعدد **ناقص واحد** ليس عدداً حسابياً ، لذلك يدعوه الرياضيون عدداً تخيلياً ، لأن جداء أي عدد « حقيقي » في نفسه هو عدد موجب ، ولايمكن أن يعطي النتيجة **ناقص واحد** . وأما جداء العدد **ناقص واحد** في نفسه فهو **زائد واحد** وليس **ناقص واحد** .

ولكم يصعب علينا أن نصدق أن دستوراً كهذا يمكن أن يكون ذا صلة من أي نوع مع عالم الفيزياء التجريبي الخالص . فما بالنا لو علمنا أنه قد أصبح فيما بعد ركناً أساسياً من أركان الفيزياء الجديدة ، وأنه نفذ إلى قلب العلم والميتافيزياء ، أفليس هذا أبعد عن التصديق مما كان شأن كروية الأرض في الماضي البعيد ؟

وقد حدث هذا كله في أيلول (سبتمبر) من عام ١٩٢٥ ، وكان لايزال أمامهم عمل كثير قبل أن ينطبق عليهم قولنا : إنهم قد ابتدعوا ميكانيكاً جديداً للذرة . وكان بورن وجوردان قد قاما بمحاولة لتوحيد الأفكار الجديدة مع أفكار ميكانيك نيوتن الكلاسيكي . وعند ذلك انضم إليهما هيزنبرغ ، فتوحدت مواهبهم الفذة لكي تتصدى بحزم لهذه المسألة الرهيبة . وما أن قدم تشرين الثاني (نوفمبر) حتى تقدمت أعمالهم إلى مرحلة تستحق النشر .

ولكن لم يكونوا آنذاك وحدهم في الميدان ، فقد دخل في الساحة باحث شاب آخر ، إنكليزي ، يدعى ديراك ، وكان معاصراً لهيزنبرغ . وقد نجح هذا بسهولة ويسر في الوصول إلى ما لم تستطع المواهب المجتمعة عند بورن وجوردان وهيزنبرغ أن تتوصل إليه إلا بخطوات بطيئة وبكثير من الجهد. وبينما كان الثلاثة يتابعون البحث معاً، تصدى ديراك وحده للمسألة ، واهتدى إلى فكرة جديدة أبعدته بعض البعد عن الصعوبات الهائلة التي لاقاها بورن وهيزنبرغ وجوردان . وعندماتمكن باولي في كانون الثاني (يناير) من عام ١٩٢٦ من إثبات تلك الحقيقة الحاسمة ، وهي أن نظرية هيزنبرغ تعطي سلم بالمر للهيدروجين بشكل صحيح ، نشر ديراك وحده تعمياً فائق التجريد والعمومية

لهذه النظرية ، وطبقها بطريقة تجعل اشتقاق تواترات بالمر من النظرية أكثر سهولة إلى حد ما .

ولكن رجلاً ، على مثل أهمية ديراك ، لايصح أن يؤرخ له عرضاً في نهاية فصل مخصص لهيزنبرغ ، بل هو جدير بأن يخصص له فصل خاص ، يعطى فيه ما يستحقه من التكريم .

١٠ ــ بول الزاهد

كان بول أندريان موريس ديراك ، يريد أن يصبح مهندساً كهربائياً ، ولكنه خشي ألا تؤهله استعداداته لهذا العمل ، فتحول عنه إلى الفيزياء المجردة التي كانت تحظى عنده باهتمام أكبر . ولسنا بحاجة لأن نعرف أكان سينجح بعمله مهندساً كهربائياً أم لا ، فهذه لحسن الحظ مسألة أكاديمية ، ولكننا نعرف أن مؤهلاته ، جعلته يتسنم كرسي الأستاذية نفسه الذي شغله نيوتن قبله في جامعة كامبردج ، مع أنه لم يكد يبلغ الثلاثين .

والحقيقة ، أن هذا الفصل ، الذي لايعد شيئاً بالنسبة للأهمية التي سيحتلها ديراك في قصتنا ، ليس سوى تمهيد لظهور اسم ديراك المتكرر في أحداث هذه القصة . وإذا كانت تصورات هيزنبرغ غامضة لدرجة أنها قد تبدو خالية من كل مدلول يمكن تخيله ، فإن أعمال ديراك ، التي تمت في خريف وشتاء عام ١٩٢٥ ، تؤلف خلاصة التجريد نفسه ، حتى ليبدو في الظاهر أن كل محاولة لتجسيدها بعيداً عن إطارها الرياضي أمراً مستحيلاً . ولكن هذا دائماً شأن الجديد الناشئ . فعلى الرغم من طبيعة هذه النظرية المجردة التي ستقوى مع الأيام بدلاً من أن تضعف ، فإن بالإمكان ، كما سنرى ، تمثيلها تمثيلاً معبراً مفهوماً . ولنز منذ الآن ، ولو بصورة مبدئية ، الأفكار التي كانت تملأ عقل ديراك في ذلك العهد ، هذا مع بقائنا على وعدنا بإيضاحها فيما بعد . ولن تكون هذه اللمحة سوى عرض موجز يبرز على الأقل جوهر اكتشافاته الأولى التي كانت أهم ميزاتها أنها نظفت نظرية الكم عامة من أدرانها .

لقد أجج نشر نظرية هيزنبرغ فوراً نار الفضول في عقل ديراك ، فبادر

وحده ، بعيداً عن أبحاث بورن وهيزنبرغ وجوردان التي كانت جارية آنذاك ، إلى إبداع نظرية جديدة للميكانيك اعتماداً على فكرة هيزنبرغ . فإذا كان x×y لايساوي y×x فلابد من إيجاد وسيلة لمعرفة الفرق بينهما مم يتألف . وهكذا راح يبحث عن شبيه لهذه الحالة في الميكانيك الكلاسيكي مستخدماً مبدأ التقابل الذي لاغنى عنه . وكانت النظرية الكلاسيكية تتضمن نوعاً من الكميات الرياضية التي تمثل بالرمز [x,y] . وهي كميات كان قد اكتشفها بواسون Poisson الفرنسي وتحمل إسمه : « أقواس بواسون » . لذلك كانت فرحة ديراك عظيمة حين اكتشف علاقة بسيطة إلى أقصى الحدود : لنحسب قيمة أقواس بواسون [x,y] بحسب النظرية الكلاسيكية ، ولنضربها بثابت بلانك وبالجذر التربيعي لـ **ناقص واحد** ، ثم لنقسم الناتج على ضعفي **π** ، إن الناتج هو قيمة الفرق بين x×y وy×x بالضبط .

ترى أتلوح لكم في هذا الكشف معالم الجفاف والجدب ؟ ولكن ديراك اعترف في أحد الأيام أن اللحظة التي انكشفت له فيها هذه النتيجة ، كانت أعمق لحظات حياته تأثراً . لقد تخطى بقفزة واحدة سريعة ومباغتة ، كل العقبات ، وتجاوز الصعوبات العديدة التي كانت تعيق بورن وهيزنبرغ وجوردان عن صياغة الميكانيك المصفوفي الجديد على هيئة الميكانيك الكلاسيكي . لذلك نشر هذا التلاقي نتائجه بعد ديراك بقليل ، فكانت نتائجهم مشابهة لنتائجه ، ولكنها لم تكن برشاقتها .

على أن هذا الاكتشاف الأول لديراك ، مضى به إلى مدى أبعد في دروب التجريد . فقد انتبه عند دراسته لنظرية هيزنبرغ ، أن الجهود لم تتركز بعد على النقطة الحساسة ، وأن الظاهر يخفي وراءه جوهراً أعمق . فالجداول المربعة التي التزموا بها ، على الرغم من أنها كانت فكرة مركزية عند هيزنبرغ ، إلا أن ديراك أشار في كانون الثاني (يناير) ١٩٢٦ إلى أنها تأتي في المقام الثاني ، وأن مكانتها لاتحتل القلب من النظرية ، بل إن في القلب شيئاً آخر غيرها . فبعد أن أزال هذه القوالب التي اعتبرها بورن وهيزنبرغ وجوردان خطأً على أنها هي البناء الأصلي ، ركز نظره على البناء السامق الصلب ، الذي كان يخفيه هذا القالب . وهكذا ، وعلى طريقة عائلة كوري التي استخرجت حفنة من

الراديوم من أكوام التراب ، قطّر ديراك من جداول هيزنبرغ المربعة المتشامخة ، خلاصتها وزبدتها الصافية ، ووصل إلى طبيعتها الجوهرية الحقة ، الوحيدة ، المتمثلة في اختلاف x×y عن y×x .

فلقد أكد ديراك بالفعل أن على العلم منذ الآن ، أن يدخل في حسابه أنه سيتعامل مع نوعين من الأعداد ، وأن عليه أن يستخدم ، علاوة على الأعداد الشائعة ، أعداداً أخرى دعاها « الأعداد q » ، التي تشذ عن قاعدة الضرب العادية التي تقول إن x×y يساوي y×x . فالعددان p و q اللذان كانا معتبرين في الميكانيك الكلاسيكي أعداداً عادية ، يجب أن يعتبرا الآن أعداداً من النمط q ، كما يجب أن يبنى هذا العلم الجديد (الذي يسمى ميكانيك الكم للتمييز بينه وبين الميكانيك المصفوفي) اعتماداً على الأعداد q .

ولكن ، هل يبقى من النظرية شيء بدون الجداول المربعة ؟ وهل ذهب ديراك حقاً إلى أبعد مما ذهب هيزنبرغ ؟ أم تراه تخلف عنه ؟ دعونا إذاً نتريث قليلاً في صحبته لكي نستطلع جلية الأمر .

لقد تبين لنا أن كميتي الميكانيك الكلاسيكي المسماتين p و q يجب أن تعدا أعداداً q . كما أن هذا أيضاً شأن الطاقة والزمن وجميع كميات الديناميك الأخرى التي تصورها هيزنبرغ على أنها جداول مربعة . ولكن ماذا بعد ذلك ؟ لابأس ، نستطيع أن نقول ، بمعنى ما ، أن لاشيء . ولكن هذا بالتحديد ما عد أعظم اكتشاف لديراك . فالميكانيك الكلاسيكي يمكن أن يتحول إلى ميكانيك كمومي بواسطة هذا الرمز الوحيد « أقواس بواسون » . لأن هذه الأقواس كانت بالنسبة للميكانيك الكلاسيكي خوارزمياً قوياً ، قادراً على تمثيل معادلات هذا الميكانيك الأساسية بصيغة بسيطة جداً . وماعلينا لتكوين ميكانيك الكم الجديد إلا أن نكتب معادلات النظرية الكلاسيكية كما هي ، ثم نعيد تفسير أقواس بواسون وفق إرشادات ديراك .

ولكن ما دور المصفوفات إذاً ؟.. إنها ثانوية ، وماعلينا ، إذا ما أردنا إظهارها ، إلا أن نجري عملية بسيطة جداً ، ثم نحصل بعدها من معادلات ديراك على

الجداول المربعة نفسها التي استخدمها هيزنبرغ عندما أراد أن يستطلع العالم المجهول الذي نفذ إليه العلم . إن هذا العلم الجديد للذرة ، على الرغم من طبيعته الأصيلة التي يتصف بها الجيل الناشئ ، فقد تبين أنه فعلاً الوريث الشرعي ، الجدير بحمل تقليد الميكانيك الكلاسيكي المحترم .

وهكذا نرى أن مبدأ التقابل الذي تخيله بوهر على شكل نداء استغاثة يائس وجهه للنظرية الكلاسيكية ، مالبث هيزنبرغ وديراك أن أبرزا فيه مدلوله العميق ، وإذا شئتم خلاصة تعبر عن هذا الواقع ، فها كم أجمل معانيه المجيدة : لقد ربط مبدأ التقابل ربطاً محكماً وأبدياً بين ميكانيك الكم والميكانيك الكلاسيكي .

١١ ـــ الإلكترون يتلاشى

إن قصتنـــا لم تنتـــهِ طبعـاً ، ومـازالت طويـلة ، فبينما كان الفـيزيـائيـون منهمكـين في الكشف عن الثروات الأسطورية الدفينـة في نظرية هيزنبرغ ، اتضح أن ترحيب أينشتين غير المتريث بأفكار دوبروي ، كان عاملاً هاماً في تطور الفيزياء . ففي نهاية العام ١٩٢٥ ، لفت المديح الذي كاله أينشتين لأفكار دوبروي ـــ التي لم تكن قد تأكدت بعد ـــ انتباه الفيزيائي النمساوي الأصل إروين شرودنجر Erwin Schrödenger . وكان هذا يعمل آنذاك في جامعة زوريخ في سويسرة .

وقد كان هذا المديح ، بمثـابـة محرض أوحى لشـرودنجر برغبـة ملحـة في العمل ، حتى أن بضعة شهور قصيرة كانت كافية لكي يقدم وحده نظرية ناجحة جداً عن الذرة . ولم تكن تربط هذه النظرية بنظرية دوبروي سوى قرابة بعيدة ، فضلاً عن أنها تختلف عن نظرية هيزنبرغ وديراك اختلافاً جوهرياً . وعلى الرغم من كل ذلك لم يكن في رياضياتها شيء غريب مستهجن ، بل على العكس ، كانت مألوفة ، حتى أن شرودنجر قدم منذ أن نشر أعماله ، حلاً لمسألة الهيدروجين الأساسية ، عرض فيه كيف استنتج من نظريته تواترات ذرة الهيدروجين . وهي كما نعلم مسألة كانت بمثابة محك قاس تعرضت له مهارات هيزنبرغ وجماعته . فنشر شرودنجر هذا الحل في كانون الثاني (يناير) من عام ١٩٢٦ ، أي في الشهر نفسه الذي نشر فيه باولي وديراك كلاً بمفرده حله الخاص لهذه المسألة . ولم يكن المرء بحاجة لأن يكون ضليعاً في علم التنجيم ليرى في ذلك تلاحقاً صريحاً لأحداث معبرة وواعدة في عالم الفيزياء[١] .

(١) أتحبون غرائب المصادفات ؟ فشرودنجر وباولي كلاهما من فيينا . ولد الأول فيها في عام ١٨٨٧ ، وولد الثاني في ←

وحين أعلن شرودنجر عن نظريته ، كان إعلانه مثيراً مذهلاً ، فهو لم يصرح أبداً كيف ولدت في ذهنـه ، ولم يكشف عن التسلسـل المنطقي لأفكـاره ، بـل اكتفى بتذكير القراء بأن بعض الإجراءات الرياضية المعروفة تعطي سلسلة من الأعداد التي يمكن استعمـالها على أنها أعداد كمومية . ثم عرض مباشرة دون تمهيد ، معادلة تموجية تعرف اليوم باسم معادلة شرودنجر ، وأتبعها بعدئذ على الفور بطريقة استخراج حل رائع لمسألة الهيدروجين الحاسمة . وقد أثار بتصرفه هذا صيحة غضب عارمة في عالم الفيزياء ، لأن العلماء لايبدون عادة اهتماماً يذكر بألعاب الخفة والسحر ، فهم يريدون أن يفهموا كيف تسير طريقة العمل ومامبرراتها ، ولايكتفون أبداً بأن توضع أمامهم النتائج المنجزة وحدها ، بل يرغبون بمعرفة أسبابها ومبرراتها الخفية . لذلك كشف شرودنجر ، بعد أن شعر بالضيق الذي أصاب أصدقاءه الفيزيائيين ، عن سر لعبته السحرية ، وشرح في مقالة ثانية كيف كانت نظريته توسيعاً لأفكار دوبروي ولميكانيك نيوتن الكلاسيكي ، ولكن ليس كما عرضها نيوتن ، بل كما طورها بعدئذ ذلك العبقري الإيرلندي ، من المقام الأول ، وليم روان هاميلتون William Rowan Hamilton .

وهنـا أصبح الوقت منـاسبـاً لأن يظهر اسـم هاملتون في سجل الأحداث . فعـلى الرغـم من أن هـذا العبقـري قد مـات في عـام ١٨٦٥ ، إلا أن أعمـاله كان لها أثر طاغ ، ليس فحسب في نظرية شرودنجر ، بل في نظرية هيزنبرغ ، وقبلها في نظرية بوهر ، وقبلها أيضـاً في نظرية بلانك . فهاملتون كان أول من أظهر أهمية الكميات p وq .ولولا أبحاثه لتأخر جداً ظهور نظرية الكم . وليته عاش زمناً أطول لكي يشهد عودة النزاع موجة ـــ جسيم ، إذاً لتوقع حتماً من هذا النزاع التطورات التي استجدت حديثاً ، لأنه هو نفسه كاد يلامسه .

كانت الفكـرة الأسـاسيـة في مقـالة شـرودنجر الأولى ، هي وجود أعداد كم بسيطـة مستـترة خلف تعقيدات الطيف الذري . وكان كل ما فعـله بوهر في البدء هو أنه أدخل في النظرية أعداداً كمومية كانت غريبة عنها ، من ذلك مثلاً العدد n في

← عام ١٩٠٠ . ولكن أين وجه الغرابة ؟ مهلاً ، إن عام ١٨٨٧ هو عام تجارب هيرتز ، وعام ١٩٠٠ هو عام اكتشاف بلانك للكم . فإذا أضفنا إلى ذلك مصادفة بوهر ـــ بالمر نجد أمامنا ثالوثاً حقيقياً .

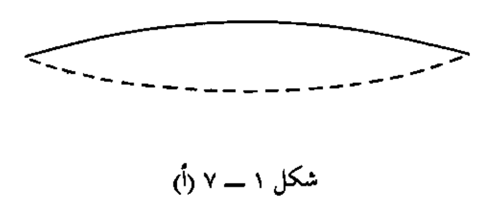
الدستور ♩ . بينما كانت رغبة شرودنجر هي تجنب مثل هذه الألاعيب . وقد تملكه شعور داخلي بأن النظرية الرياضية الجيدة للذرة ، هي تلك التي تستخدم طريقة تتولد فيها الأعداد الكمومية من تلقاء ذاتها من النظرية نفسها . فلنمضِ إذاً إلى البحث عن هذه الطريقة ، ولندع مدلولها الفيزيائي يبرز منها من تلقاء نفسه .

كان الفيلسوف فيثاغورث قد اكتشف منذ ماينوف عن خمسمئة عام قبل المسيح علاقة طريفة بين الموسيقى وبين الأعداد . إذ وجد أن وتر الآلة الموسيقية إذا ما نقر عليه وأعطى نغمة « دو » ، فإن الوتر المشابه له والذي طوله نصف الوتر السابق يعطي نغمة « دو » أيضاً ، ولكن بفارق أوكتاف (٨ درجات في السلم الموسيقي) أعلى من السابقة (أي أشد حدة) . كما يعطي وتر ثالث طوله ثلث الأول نغمة « صول » أعلى من السابقة ، ويعطي وتر رابع طوله ربع الأول نغمة « دو » أعلى من السابقة، ويعطي وتر خامس طوله خمس الأول نغمة « مي » أعلى من السابقة وهكذا .وما أن ظهر هذا الكشف لفيثاغورث حتى أخذ منه الحماس والنشوة حداً جعله يصرِّح على الفور أن الأعداد — ويعني الأعداد الطبيعية الساحرة — هي مفتاح أسرار هذا الكون . ولكن مالبث أن خابت آماله بعد حين عندما توصل إلى اكتشافه الكبير الآخر المتعلق بوتر المثلث القائم . لأن هذه النظرية برهنت على وجود أعداد تتحدى كل محاولة للتعبير عنها بعبارة عددية محدودة يقبلها العقل (من ذلك مثلاً الجذر التربيعي للعدد ٢) .

وحالياً ، نحن نعلم أن الوتر الأول نفسه يصدر جميع هذه النغمات المختلفة في وقت واحد . ولكن أخفض نغمة بين هذه النغمات هي الوحيدة التي تدركها أذننا عادة ، أما النغمات الأخرى فتقتصر أهميتها على أنها تعطي هذه النغمة (الأولى) لونها أو جرسها ، وهذا كل عملها . وهي في الحقيقة المدروجات التي سبق الحديث عنها . فالوتر في اهتزازه إذاً يحتوي فعلاً على متتاليات من الأعداد مطابقة لمتتاليات الأعداد التي فطن إليها شرودنجر .

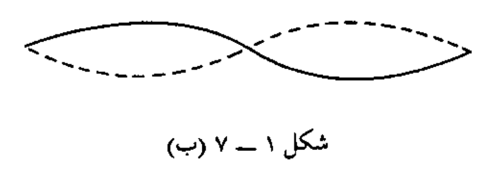
بالفعل ، إذا أخذنا وتركمان مثلاً ، فإن هذا الوتر لايمكن أن يهتز على هواه . ذلك لأن نهايتيه مثبتتان ، فلايمكن له أن يهتز إلا بحيث تبقى نهايتاه ثابتتان .

وهذه ملاحظة ، على بساطتها ووضوحها ، إلا أنها معبرة ، لأنها تنص بحق عن الواقع الذي يحدد الاهتزازات ويدخل متتاليات الأعداد الصحيحة . فالوتر يمكن أن يهتز بأكمله كما يلي :



شكل ١ ــ ٧ (أ)

أو كما يلي (على قسمين) :



شكل ١ ــ ٧ (ب)

أو على ثلاثة أقسام :



شكل ١ ــ ٧ (جـ)

أو على أربعة أو خمسة أو ستة أو أي عدد صحيح آخر . ولكن لايمكن أبداً أن يهتز على قسمين ونصف كما في الشكل :



شكل ١ ــ ٧ (د)

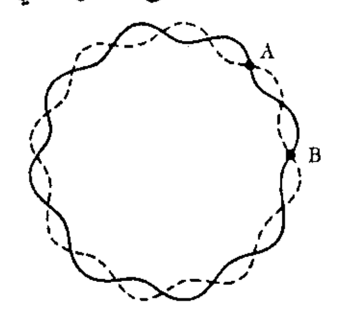
لأن طرفاً واحداً على الأكثر ظل مثبتاً هنا ، وهكذا نرى كيف أن هذه الملاحظة الواضحة

حول ثبوت الطرفين تؤدي لامحالة إلى متتاليات الأعداد الصحيحة ١ ، ٢ ، ٣ .. بل وتدخلها بصورة طبيعية إلى أقصى حد ممكن .

فأمامنا إذاً أقوى دليل مقنع بلاشك ، وهل نحن بحاجة لباعث أقوى من هذا لكي نسرع إلى تطبيق هذ المبدأ على الذرة ؟ فدوبروي كان قد أخطرنا بأن في الذرة أمواجاً جاهزة للاستعمال . فدعونا ننصرف عن هيزنبرغ هذا ، فمن يدري أن نظريته أفضل حقاً من نظرية بوهر أم حتى بمثل صلاحها ؟ هاكم ما أمامنا ، إنها فكرة مدهشة بكل معنى الكلمة ولاتنتظر منا سوى التطبيق .

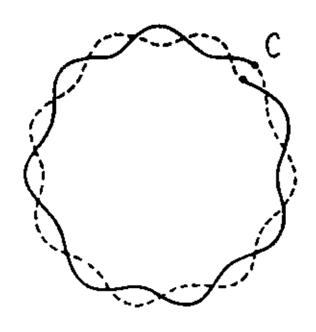
ولكن مهلاً ! فأن يكون لدينا فكرة مدهشة شيء ، وأن نعرف كيف نطبقها شيء آخر .

وماذا نقول ؟ هل تلزمنا ضمانات أخرى ؟ وهل بعد تجميع كل هذه الأسباب القوية نحجم عن الإقدام واقتحام هذه الطريق ؟ إن لدى دوبروي اقتراحاً آخر أيضاً ، وهو اقتراح لايقاوم . لنأخذ مثلاً حلقة فولاذية رقيقة ، فإذا نقرت على هذه الحلقة فإنها تطلق اهتزازاً موسيقياً . وهنا لايمكن أن نقول إن هذا الاهتزاز ناشئ عن أن نهايتي الحلقة مثبتتان . ولكن الحلقة ، لكونها دائرة ، فإن اهتزازاتها ستكون حتماً محدودة أيضاً ، وستكون كلها تقريباً على نمط واحد . لأننا نستطيع أن نعتبرها وتراً لحمت نهايتاه معاً . فالحلقة يمكن أن تهتز بأكملها على قسمين ، أو على أربعة ، أو على ستة ، ولكن ليس أبداً على قسمين ونصف . فقد تهتز على النحو التالي :



شكل ١ ــ ٨ (أ)

ولكن ليس أبداً على النحو : (حيث تبدو الحلقة وكأنها مقطوعة عند النقطة C)



شكل ١ ــ ٨ (ب)

لأن الموجة في هذا الوضع الأخير لن تعود إلى الالتحام مع بدئها بعد أن تنتشر على طول الحلقة (ثم إن الحلقة لايمكن أن تحافظ على محيطها إلا إذا كان عدد الأقسام المنحنية إلى الداخل مساوياً عدد الأقسام المنحنية إلى الخارج ، ولذلك لايمكن أن تهتز إلا على عدد زوجي من الأقسام) . ولما كان طول الموجة ممثلاً على الشكل بالمسافة الفاصلة بين A وB ، فالحلقة يجب أن تحوي دائماً عدداً صحيحاً من أطوال الموجة (أي عدداً زوجياً من أنصاف الموجة) . لذلك ءألا يذكرنا هذا بشيء آخر ؟ بشيء يتعلق بطول يتكرر عدداً صحيحاً من المرات ليكمل دورة الدائرة ؟ إنه حتماً يذكرنا بشرط مدار بوهر الذي شبهناه بخط سير الترام الذي يجب أن يحوي عدداً صحيحاً من قطع الأسلاك ، لأن هذه القطع لايجوز كسرها (بل توصل على ما هي عليه ، وإلا وجب تغيير الطريق) . وكانت هذه المشكلة (مشكلة خط الترام) تبدو دائماً مشكلة تعسفية مصطنعة . ولكن لو حسبنا الآن على طريقة دوبروي طول الموجة المصاحبة لإلكترون على طول مدار بوهر ، لحصلنا على نتيجة رائعة حقاً ، سنجد أن طول الموجة هو بالضبط طول قطعة السلك الواحدة الملائمة تماماً للمدار (أي الطول الذي يحوي منه المدار عدداً صحيحاً من المرات) . وهذا ما يجعل الصورة كلها واضحة أمامنا ، لقد عثرنا على حلقتنا الفولاذية الضائعة (أي على المدار الملائم) على حد تعبير دوبروي عام ١٩٢٤ . وبذلك بدأت الذرة تصبح مفهومة .

ولكن من أين بدأ شرودنجر ليصل إلى معادلته ؟ أيبدأ من فكرة إرفاق كل إلكترون بموجة ، وهي الفكرة التي كانت تملأ رأس دوبروي منذ بعض الوقت ،

دون أن يصل منها إلى نظرية مقبولة عن الذرة ؟ ولكن من يدري فلربما كان فشل دوبروي راجعاً إلى أنه كان يفكر بعبارات النظرية النسبية . ثم إنه كان هناك عمل موحٍ جداً قام به هاملتون قبل ظهور النسبية بزمن ليس بالقصير ، وكان لهذا العمل كما يبدو ، صلة غامضة مع هذه المسألة ، فلعل التقدم يكون أسرع لو تخلى عن النسبية ؟ ولاسيما أن هناك شعوراً متزايداً بوجود حاجة ملحة لمعادلة موجية ، فتاريخ انتشار الأمواج كله كان يشير إلى هذه النتيجة . وكان يعرف منذ زمن بعيد أن اهتزازات الأوتار ، وأنابيب الأورغ ، والطبول ، والمواد الجلاتينية ، والأمواج المضيئة ، كلها تخضع اهتزازاتها لمعادلات تموجية ذات أنماط متشابهة . ومن المعروف كذلك أن كل معادلة تموجية تولد متتالية من الأعداد عندما نفرض عليها شروطاً رياضية إضافية ، وهي على كل حال شروط طبيعية هنا ، لأنها تعبر بلغة رياضية عن أن نهايتي الوتر مثبتتان ، أو أن جلد الطبل مشدود وملتصق بإطاره الخارجي ، أو أي شروط أخرى من هذا القبيل ، معقولة واضحة .

وهكذا انتهى شرودنجر من هذه الخواطر إلى قراره ببناء نظرية ذرية . ولم يكشف عن سر الطريقة التي اتبعها لمعالجة هذه المسألة ، بل لجأ إلى بعض الأساليب الرياضية المعبرة ، فاختار بكل حكمة مصادر وحيه وإلهامه (كمعادلة هاملتون ذات التفاضلات الجزئية ، والتكاملات الأصغرية ، والأشكال التربيعية في فضاء الأطوار) ، ثم خلق بطريقة سحرية ، من لاشيء ، معادلة مكتملة النضج زاخرة بقدرات ذات شأن كبير .

ولم يطبق هذه المعادلة على الأوتار أو على الصفائح المهتزة ، بل على « كيان » أو « روح » يملأ نوعاً من الفضاء الرياضي الذي يعرفه الرياضيون حق المعرفة ، فهم يخلقونه بخيالهم . ويشار إلى هذا الروح بالحرف اليوناني ψ (بساي) .

والروح ψ الذي تحدث عنه شرودنجر ، حر في أن يهتز على هواه ، ولكن ضمن شروط (ولو تريثنا هنا لكي نحاول فهم هذا الروح لضللنا عن طريقنا) . وهذا الروح ، مربوط من الوجهة الرياضية بالحدود القصوى للفضاء المجرد الخيالي ، فكان لابد أن ينشأ عن هذا الربط ظهور أعداد كمومية .

وأظن الآن أن كل قارئ أصبح يتوقع حتماً ، أن ما ستقوله بقية القصة بشأن مسألة ذرة الهيدروجين ، هو أنه عندما طبق شرودنجر معادلته التموجية على هذه الذرة ، اكتشف ، وهو مزهو بالنصر ، أن تواترات الروح ψ هي بكل دقة علامة الصنع المميزة لهوية هذه الذرة المتمثلة في طيفها .

ولكن الحقيقة غير ذلك ، إذ لم يكن نصر شرودنجر سوى مأزق مربك ، لأن تواترات الروح ψ كما تبين ، هي التواترات الخاصة بدرجات سلم بالمر . ولما كانت الفروق بين هذه التواترات هي وحدها التي تظهر في الطيف ، فقد طرح هذا الواقع مسألة طريفة : فإلكترونات « الأيام الماضية » اختفت من مداراتها ، وابتلعها الكيان الجديد ψ ، أي تلك القيمة الإلكترونية الباهتة التي تهتز محلقة حول النواة . ولكن كيف نفسر فرق التواترات إن لم نتصور أن هناك إلكترونات تقفز ؟

وهنا قدم شرودنجر تفسيراً مقبولاً على قدر ما يمكن أن تتفق كلمة مقبول مع الفيزياء الذرية . فهذه الاهتزازات يمكن تشبيهها باهتزازات أوتار آلة موسيقية . إذ ، أليس في الموسيقى ما يشبه ذلك ؟ فعندما تكون النغمتان غير متفقتين تماماً ، ألا تحدث ظاهرة خفقان ؟

لنفرض ، على سبيل المثال ، أن هناك نغمة تهتز مئة مرة في الثانية ، وأن نغمة أخرى تهتز مئة مرة ومرة ، وأن النغمتين متفقتان في البدء بالطور (أي بدأتا معاً) ، إن النغمتين ستتعارضان مباشرة بالطور بعد نصف ثانية ، لأن الأولى تكون قد اهتزت خمسين هزة كاملة ، أما الأخرى فتكون قد اهتزت خمسين هزة ونصف هزة ، لذلك سيبطل عمل إحداهما عمل الأخرى ويخمدها ، كما في حالة البلياردية ولكنهما بعد نصف ثانية أخرى سيتفقان بالطور من جديد وسيقوي عمل إحداهما عمل الأخرى ليكونا أثراً أعظمياً . إن تناوب هذا التخامد والاشتداد ثم التخامد وهكذا ، بإيقاع منتظم ، سيتكرر بمعدل مرة في الثانية ممثلاً الفرق بين التواترين الأصليين . فالتواتر الناجم عن فرق التواترين ، يولد إذاً من اجتماع التواترين الأصليين (فالزواج إذن يثير الخلافات ، حتى في الفيزياء) .

ويحمـل هذا التواتر الجديد اسـم تواتر الخفقـان . وهو يسمع كالخفقـان فعـلاً ، أو كالرعشـة ، أو مـا يسـمى بـلغـة الموسيقى تريمولو Tremolo . هذا ما يسمع واضحاً عندما يصفر شخصان النغمة نفسها تقريباً (أي مع فارق بسيط بينهما) . كما أن بعض أصـوات جهـاز الراديو التي تبدو كالنعيق أو المواء ، تنجـم عن تواترات الخفقـان . ولقد استغـل صـانعو الأورغ هذا الخفقـان في إصـدار بعض آثار التريمولو (الرعشات) بواسطة أنبوبي أورغ جعلاهما عن عمد مختلفين اختلافاً ضئيلاً ، يمكنه أن يُحدث الخفقان أو الرعشة (التريمولو) المرغوبة .

والآن ، لنرَ كيف استـفـاد شـرودنجر من هـذا الخفـقـان . فـذرتـه تهتز بحسب التواترات الخاصـة بدرجات سلم بالمر . ولما كانت التواترات المطلوبة (أي تواترات إشعاعات طيف الذرة) هي الفروق بين تواترات هذا السلم ، فهي ليست شيئاً آخر غير تواترات الخفقان . وأما الروح ψ ، فهي الآن روح إلكترون متلاشٍ . وقد كان معروفاً عن الإلكـترون المهـتز ، أنه يصدر إشعاعاً ، إلا أن بوهر لم يتردد في نفي هذه النقطة ، لأنها كانت تتعارض كلياً مع تصاميمه . فلنقرر إذاً ، على شكل حقيقة « منزلة » (مفترضة) أن تواترات خفقان الروح ψ هي التي تتحول إلى ضوء ، وبذلك نصل مباشرة إلى تفسير « العلامة » المميزة للذرة ، ولاسيا إذا تغاضينا عن كل الاعتراضات التي يمكن أن توجه إلينا (ولقد قدم شرودنجر فيا بعد وصفاً مغايراً لهذا ، ولكن ذلك لايعنينا هنا) .

ثم مـا أهميـة ذلك كله طـالمـا أن التواترات المطـلوبـة تظهـر في نتيجـة الحسابات الرياضية . وإذا كان التمثيل الفيزيائي لهذه الحسابات غامضاً بعض الغموض ، فهذا ما يصح أن يقال أيضاً عن نظريات هيزنبرغ وديراك وحتى بوهر . ثم أفلا يكفينا أن تكون الأجوبة الحسابية مطابقة للواقع . فمثل هذا التطابق سيشق الباب المؤدي إلى عالم المجهول ، فلا يبقى أمام العلم سوى خطوة واحدة ليفتحه على مصراعيه ، ثم يتخطاه ، ويترك للزمن بعدئذ أن يجلو هذه الغوامض . إذاً لقد أصبح طريق التقدم في العلم واضحاً .

حقـاً إن الطـريق مرسـومـة بوضـوح . ومسـألة سـلم بـالمر التي كانت غـير محلولة في المـاضي أصبح لها الآن ثلاثة حلول مختـلفـة على الأقل . فحـين كانت

المشكلة ، هي وفرة التواترات الطيفية والعلاقات الخاصة التي تجمع بينها ، تخيل بوهر ، لتفسيرها ، أن الإلكترونات تقفز من مدار إلى مدار . أما هيزنبرغ فقد تصدى للمسألة بأن استبدل بلوائح الغسيل ، الجداول المربعة . وهاهو شرودنجر يأتي بتأويل ثالث . فهو لم يفكر ، لابإلكترونات تقفز ولابجداول مربعة ، بل بخفقان روح كهربائية مهتزة تدعى ψ .

أيعقل أن يكون العلماء قد فاقوا الحد في نجاحهم ؟ لقد راودت هذه الفكرة أذهان الفيزيائيين كثيراً . ففي عام ١٩١٢ ، أو قبله بما يقرب من عشر سنوات ، لم تكن هناك نظرية صالحة لذرة الهيدروجين ، وفي كانون الثاني (يناير) من عام ١٩٢٦ ، أصبح هناك أربع ، هذا إذا عددنا نظريتي هيزنبرغ وديراك نظريتين متمايزتين . ولو لاحت على هذه النظريات سمة الطائفة الواحدة ، لهان الأمر وخفت الحيرة ، ولكن أين نجد أوجه الشبه بين مدارات بوهر وجداول هيزنبرغ المربعة ، والروح ψ عند شرودنجر ؟ إنها حقاً وفرة تضلل الفكر وتحير العقل .

ثم ما النتيجة التي كان باستطاعة المرء أن يخرج بها من كل ذلك ، ومن أي جهة كان يمكنه أن ينظر للفيزياء في شهر كانون الثاني هذا (يناير) العاصف ؟ فنظرية بوهر ، المفعمة حكمة وتجربة ، يحق لها أن تفخر بأمجادها السابقة ، ولكنها شاخت كثيراً وأرهقها العجز . والنظريتان الأفتى ما زالتا أقل تجربة ، وليس لهما إلا القليل من الانتصارات . ولكنهما بشرتا بإبعاد نظرية بوهر عن الساحة لأنهما أظهرتا قدرة مناعية تجاه الأمراض التي أوهنت أعداد بوهر الكمومية ، إنهما لم تتعرضا حتى الآن إلى أي فشل . كما أن المصفوفات والأمواج يجريان كفرسي رهان دون أن يتحقق السبق لإحداهما على الأخرى . فأول نصر مبكر حققه هيزنبرغ وجسيماته في تموز (يوليو) ١٩٢٥ ، عادله شرودنجر في شباط (فبراير) ١٩٢٦ . ولقد برهن ديراك أن نظرية هيزنبرغ من أصول كريمة . ولكن شرودنجر برهن كذلك أن دماء نظريته نقية وتتحدر من أجداد نبلاء كلويس دوبروي وهاملتون . وإليكم سر محتدها النبيل وولادتها المشرفة .

إن ما يشكل أساس ميكانيك نيوتن ، هو قوانينه الثلاثة التي تضبط

الحركة . غير أن هناك قاعدة صلبة تمتد في الأغوار تحت هذا الأساس ، وهي تتألف من مجموعة من المفاهيم الأساسية العديدة التي عُدَّت يوم اكتشافها ثورية ، وكانت قد قبلت دون نقاش ، حتى أن الأسلوب الذي عدلتها فيه نسبية أينشتين بدا لأول وهلة غير طبيعي إلى حد ما . وكانت هذه المفاهيم المضمرة خلف قوانين نيوتن ، أي مفهوم المكان النيوتوني ومفهوم الزمان والمادة ، فرضيات أساسية مسبقة (مسلمات) لايمكن أن تصاغ قوانين الحركة بدونها ، كما لايمكن للرياضيات بدونها أن تأخذ بناصية هذه القوانين لتحولها إلى معادلات . وعندما قدم لاغرانج وهاملتون مساهمتهما في تطوير ميكانيك نيوتن ، لم يشككا أبداً بفلسفته ، لأن الرأي العام في ذلك العصر لم يكن مؤهلاً للتلاعب بالأفكار الأساسية ، لذلك انصرفت جهودهما بدلاً من ذلك إلى تطوير هذه المفاهيم لكي يصلا بها إلى قمة تعبيرها الرياضي ، لاعتقادهما أنهما بذلك سيبلغان آنذاك تفسير الكون كله .

ومعادلات الحركة عند نيوتن ، تصف حركة الأجسام ، فتصف مثلاً حركة جسم قذف في الهواء . وهذا طبعاً مثال يطرح مسألة يسيرة ، ولكن الأيسر منها ، هو أن تعرض أمثلة أعقد من هذا المثال . لنفرض أننا جمعنا أنقاضاً من كل نوع على شكل كومة من الخردة ، وربطنا كل ذلك بواسطة نوابض وخيوط مرنة ، وفجأة ، وبحركة التفاف مخادعة ومباغته ، أطحنا بهذه الكومة المهتزة للرياح . ففي هذه الحالة أيضاً ، يمكن من الوجهة النظرية ، تطبيق قوانين نيوتن ، ولكن الحركات التي سندرسها ستكون معقدة بأكثر مما يحتمله إنسان من التعقيدات الرياضية . وعلى الرغم من اكتشاف طرق مختلفة لتقليص التعقيد في مسألة من هذا النوع ، إلا أن الرياضي الكبير ج . ل . لاغرانج Lagrange هو الوحيد الذي وضع بعد نيوتن بمئة عام طريقة تؤدي إلى تبسيط حقيقي مرموق لها .

في هذه الطريقة شيء يسترعي الاهتمام فعلاً . فكومة الخردة التي طوحنا بها للرياح ، ستتحرك هي وأجزاؤها حركات متزامنة معقدة جداً بحيث يستحيل تقريباً معرفة ما يجري لها . إلا أن هذا التعقيد أمكن تلطيفه بأسلوب رياضي بسيط . إنه لن يختفي كلياً ، ولكن يمكن تخفيفه بحيث لن يعود مزعجاً كما كان . ويقوم هذا الأسلوب على

إنشاء فضاء خيالي له عدد كاف من الأبعاد بحيث يمكن أن تمثل حركة كومة الخردة كلها بالدرب المتعرجة التي تخطها نقطة تمثيلية بسيطة تنتقل في هذا الفضاء التخيلي . ولاضرورة هنا للخوف والتراجع ، فنحن كثيراً ما نستعمل هذه الفضاءات الخيالية في حياتنا اليومية . بالفعل ، إن الخط البياني لدرجة حرارة مريض ، ليس سوى خط ترسمه نقطة تمثيلية في فضاء خيالي (مصطنع) ذي بعدين ؟ بل إن أكثر الحالات التي تستخدم فيها الخطوط البيانية ، تستعمل فضاء تمثيلياً . كل ما في الأمر أن الفضاء سيكون له في حالة الديناميك أبعاد عديدة ، وهنا يكمن سر هذا الأسلوب . فتعقيدات المسألة احتجبت هنا خلف أبعاد الفضاء العديدة ، وحركة كومة الخردة المخيفة في تعقيدها ، تحولت إلى حركة نقطة وحيدة يسهل تخيلها . إذ إن هذه النقطة تنتقل حقاً في فضاء معقد ، ولكن مفهوم حركة النقطة أسهل بما لايحد من حركة كومة الخردة الطائرة التي تمثلها . لذلك ، فهي تمهد الطريق بيسر لاكتشافات لاحقة جديدة .

ولقد أتى أول هذه الاكتشافات اللاحقة بالفعل على يد هاملتون صاحب المواهب الخارقة . فهاملتون هذا هو الذي اكتشف أيضاً ، وحتى قبل كايلي ومصفوفاته ، وجود كميات غير حسابية يكون فيها x×y لايساوي y×x (ولكنه اكتشفها في ظروف مختلفة عن ظروف كايلي) . وهاملتون كذلك هو الذي أعطى معادلات الديناميك الأساسية شكلها البسيط ، باستعماله الكميات p و q التي قدر لها أن تصلح أساساً لسائر الأبحاث النظرية اللاحقة في الفيزياء الذرية ، وهو الذي توج هذه الأبحاث بمفهومها الرياضي الأساسي ــ أي بعبارة الطاقة التي تعرف الآن باسم الدالة الهاملتونية ــ وقد يهم القارئ أن يعرف أيضاً أن هاملتون كان يتكلم وهو في الثالثة عشر ، ثلاث عشر لغة[1] ، وفي الثانية والعشرين أصبح أستاذ الفلك في الجامعة ، وفي عام ١٨٣٤ (وكان في الثامنة والعشرين) ، طور علم الميكانيك إلى الأسلوب الذي يدرس به حالياً ، حتى لقد سبق تقريباً شرودنجر إلى كشفه .

---

(١) قد يسلي القارئ أن يعرف أن هاملتون كان يقرأ وهو في الخامسة من عمره اللاتينية واليونانية والعبرية . وعندما أصبح في العاشرة صار يقرأ العربية والسنسكريتية . وفي الرابعة عشر كتب خطاب ترحيب بالفارسية لسفير الشاه . وفي السابعة عشر أمسك بزمام التحليل الرياضي وابتعد نهائياً عن اللغات إلى الرياضيات . (المترجم)

فمهمـا كان خط سـير النقطـة التمثيـليـة متعرجاً في فضـائها الخيـالي ، كان هـامـلتون يعرف بقدرة عجيبـة كيف يحني شعـاعاً من الضـوء ليسـير على الخط نفسه ويظل متابعاً له . لأن شعاع الضوء ليس محتماً عليه أن يسير في خط مستقيم ، بل إن أي موشور بسيط أو عدسة أو هواء ساخن يحرفه عن مساره . كما أن كل عيب في تجانس الوسط الذي يمر فيه يجعله ينحرف عن خط سيره . وهذا ما يحدث في الصحراء مثلاً حين يكون الهواء المجاور للرمال أشد حرارة مما هو في الطبقات الأعلى ، فيفسد بذلك تجانس الهواء ويحرف الأشعة الضوئية ، مما يسبب ظاهرة السراب المعروفة . وما من سائق سيارة إلا ولاحظ على طريق اسفلتية جافة وحارة ، وجود بريق مراوغ يشبه الماء الرقراق الذي تخطه التموجات . فالسراب إذاً هو أيضاً شاهد عابر على انحناء الأشعة الضوئية .

وهكذا اختـار هاملتون الشكـل الملائم من عدم التجـانس لفضـائه التمثيلي لكي يتخيـل فيـه شعـاعاً ضـوئيـاً يسـير جنباً إلى جنب مع النقطة التمثيلية وعلى خط سيرها ، فخلق بذلك رابطة بين علم الأشعة الضوئية وبين الديناميك ، وأصبح منطقياً بالتالي ، أن نتوصل إلى أن هذين العلمين المختلفين لافرق بينهما من الوجهة المنطقية . وقد تمكن هاملتون فعـلاً من البرهان على ذلك بالتفصيل وبطريقة رياضية متينة ، واستعمل لأجل ذلك طبعاً لغة فضائه التمثيلي ، فكان هذا بحد ذاته شاهداً على الفائدة التي يسديها لنا إدخال هذا الفضاء . وإلا فمن كان باستطاعته أن يتخيل دون هذا الفضاء لغة مشتركة بين الضوء وبين كومة الخردة (التي لا ننكر طبعاً أنها ، خلافاً للضوء ، لو صادفت العين لآذتها) ؟

لقد فعـل هاملتون ما هو خير من إرفاق شعـاع مضيء بخط سـير النقطـة التمثيـليـة . فشعـاع الضـوء يمكن اعتبـاره إلى حد ما ناشئـاً عن مسـار نقطة مضيئة . ولكن هاملتون مضى في بحثه إلى ما هو أبعد من شعاع وجسيم . لقد أدخل جانباً من مفهوم الموجة ، هو ذلك الذي يضبط خط سير الشعاع . فكانت النتيجة أنه حول علم الديناميك إلى دراسـة الأمواج الضوئية . ولكن ليس دراسة تداخل الأمواج على طريقة الملياردبرية ، بل الأمواج التي انتزعت منها هذه الخاصة الأساسية ، أي التداخل . وليس هذا بغريب ، ففي علم البصريات (الضوء الهندسي) تصلح الأشعة تماماً لدراسة أبسط

خواص الأدوات البصرية . ولكن عندما تدعو الحاجة لشرح الظواهر الدقية ، يصبح من الضروري الرجوع إلى التداخل . ترى ، ألا يسري ذلك على الميكانيك الكلاسيلي ؟ إن دينـاميك نيوتن مثلاً صـالح للظواهر التي تحدث على الصعيد المكبر مثلما أن استخدام الأشعـة المضيئـة مفيدة في إعطـاء نتائج جيدة عند حسـاب مزايا نظارة مزدوجة ذات موشـور . إلا أن هذا الدينـاميك يصبح عديم النفع عند دراسـة منظومات لها أبعـاد « ذرية » ؟ إذاً أفلا تكمن الحقيقة في أن ديناميك نيوتن هو ديناميك الأشعة ، في حين أن الديناميك المطلوب لأبعاد الذرة الصغيرة هو ديناميك الأمواج ؟ إنها فعلاً فرضية معقولة وطريفة .

وكان دوبروي قد أشـار فيما مضى إلى شـيء من هذا القبيـل . فقد فكر يومئـذ في مسـألتي المكـان والزمان في إطار النسبيـة . أما هنـا ، فبـين يدي شـرودنجر ديناميك ضوئي مكتمل في فضاء خيالي مصطنع . ولاينقصه بعد طول العهد والتعديل الفائق سوى تعديل طفيف . وقد انتبه شرودنجر إلى عظمة الإمكانيات التي يوفرها له هذا الديناميك ومفاهيم هاملتون الضوئية . فابتعد عن النسبية ، مدركاً ما في ذلك من صعوبة فنية . فما كان منه إلا أن افترض وجود القدرة على التداخل في أمواج هاملتون العاجزة . وبذلك أصبحت هذه الأمواج أمواجاً حقيقية ، تُوَلِّد بانتشارها الأشعة نفسها التي كانت تُوَلِّدها في السابق في حال ظواهر العالم المكبر (أو الكبري) . ولكنها في الوقت نفسه قادرة على إظهار مزايا جديدة كلياً فيما لو طبقت على ميدان الذرة .

وإذا أردنـا أن نعـرف إلى أي مدى كان هذا التفكـير طبيعيـاً معقـولاً ، فمـا علينـا إلا الرجوع إلى دراسـة تاريخ الضـوء ، لأن الضـوء أيضـاً كان في بادئ عهده علم أشعة (علم بصريات) ولم يلمس الحاجة إلى خواص تموجية إلا حين اكتشفت ظواهر ضوئية أكثر رهافة ودقة . وأما إلى أي مدى لقي هذا التفكير استقبالاً حسناً ، فهذا ما تشهد عليه الأشهر الساخنة التي أعقبت أول مقالة نشرها شرودنجر .

وسـرعـان مـا تبـين أن نظـريـة شـرودنجر منـافس خطـير لنظرية هيزنبرغ بـالنسبـة لدقـة النتـائج ، حتى أنهـا كانت في وضـع يؤهـلهـا لأن تبزها في شهرتها .

فهي تجنبنا الصعوبات التقنية العجيبة الموجودة في نظرية هيزنبرغ ، وتقدم لنا صورة مريحة عن مجرى العمليات في الذرة ، كما يمكن لنبل منبتها أن ينافس منبت نظرية ديراك . أضف إلى أن طبيعتها الدافئة الخيالية تجعلها أكثر لطفاً وأرق معشراً . فهي تعطي نتائجها بشيء من اليسـر ، وتتحدث بلغة رياضيـة مألوفة دارجة على ألسنة الفيزيائيين النظريين ، ولاتتطلب منهم أن ينصرفوا إلى رياضيات لم يألفوها بعد ، ولا أن يبتكروا أسلوباً خاصاً لكل مسألة جديدة . هذا بالإضافة إلى أن أساليب نظرية شرودنجر كانت قد هيئت وعبئت بكل إتقان قبل ظهور مقالته ، فكانت كأنها تنتظر مجيئه أو أعدت بطلب منه . فقد ظهر في عام ١٩٢٤ كتاب في الرياضيات هو بحق ظاهرة من تلك الظواهر التي تستبق الأحداث ، حتى لكأنها تهيئ لها فتفسد على المؤرخ حلاوة سرد المفاجآت في مجرى قصته . وكان مؤلفا الكتاب رياضيين بارزين هما ر . كورنت R.Courant ود . هيلبرت D.Hilbert اللذان لم يكونا فيزيائيين وإنما كانا قائدي فريق الرياضيات في جامعة غوتنجن . لقد عنونا كتابهما باسم طرق رياضية للفيزياء ، وضمناه تقريباً ، وبشكل مكثف وملائم ، جميع الأساليب والآليات والطرق والتفاصيل الضرورية لتطوير نظرية شرودنجر ، هذا إن لم نقل لقسم كبير كذلك من المبادئ التي تطبق في نظرية هيزنبرغ .

١٢ ـــ التوحيد

بدا العـلم في هذه البـلبـلة ، وكأنـه يعرض علينـا ألعاباً سحرية طريفـة . فبعـد أن تحطمت نظـرية بوهر بـين يديه إلى أشـلاء ، سـارع جاهداً إلى إنقـاذ ماء وجهه بأن أطلق في الفضاء أربع نظريات على التوالي هي نظريات دوبروي ، هيزنبرغ ، شرودنجر ، ديراك . ثم راح يلعب بها بمرح وخفة ، وكأنه تخفى على غير عادته بزي ساحر . فكانت أربع نظريات محيرة تخطف الأبصار ، وهي تحوم في الأرجاء . وأربع نظريات شيء كثير حقاً ، فما من واحدة منها استقرت على الأرض (أي أصبحت معتمدة نهائياً) .

ولكن العـلم ليس بـاستطـاعتـه أن يستمر في هذه اللعبـة التـافهـة إلى مالانهاية ، لقد بلغ به المرض مرحلة حرجة ، وأزفت اللحظة الحاسمة . وما من نظرية أخرى مهيأة للظهور لتزيد الوضع إرباكاً . لذلك ركب العلم لنفسـه ، على الرغم من حالته المحزنة ، دواء فعالاً فيه علاجه ، أو إن شئت « فيزياؤه الجديدة » . وعما قريب سيخفف البرء أسقـامه وينفخ فيه قوة ونشـاطاً لم يعهدهما أبداً من قبل . فالموجة والجسيم ستتم المصالحة بينهما ، وستلتقي النظريات المتطاحنة ليولد من التقائها تفاهم جديد . فكل هذه الآلام ، كانت آلام مخاض ، وسيولد بعده علم عظيم ولكنه متواضع .

لقـد بدأ شـيء من النظـام يـتراءى للعيـون . ومنـذ البـدء ، كان واضحـاً أن نظـريتي دوبروي وشـرودنجر متشـابهتـان ، وكذلك نظريتـا هيزنبرغ وديراك . فلم يكن أمام العلم سوى خطين ليسير فيهما إلى الأمام ، ولكنهما كانا متباعدين ، حتى أن كل أمل لتقريب أحدهما من الآخر كان يبدو عبثاً لاطائل منه .

ولكـن ، حـتى هـذا التنـافر ذاتـه ، فيـه شـيء مريب . فمـا من نظـرية

فـازت بنصر مؤزر على الأخرى . بـل لعمـري إنـه ليصح القول إن كلاً منهمـا تقـلد انتصـارات منافستها . وليس لإحداهما أن تتعالى على الأخرى بنبل المحتد . فهذه وتلك تتفـاخر بأنها من منبت كريم ، وتعلن على رؤوس الأشهاد بأنها الوارث الطبيعي الوحيد للميكانيك الكلاسيكي . وواقع الحال أن إحداهما تحدرت من الميكانيك والأخرى من علم البصريات . ولكن ، ألم يربط هاملتون نفسه علم البصريات بالميكانيك في النظرية الكلاسيكية ؟ فلماذا إذاً لاتكون النظريتان الجديدتان أختين ، بل وحتى من الجائز توأمين عل الرغم من اختلافهما الظاهر ؟ فمنشآهما المتباينان ظاهراً ، قد يكونان منشأ واحداً ؟ إذ ليس من الطبيعي أن يكونا ابنين معترفاً بهما للميكانيك الكلاسيكي ، ثم يكونان مع ذلك متباينين إلى هذا الحد كما يوحي بذلك مظهراهما الخارجيان . ولاسيا أنه ما من واحدة منهما استطاعت أن تبز الأخرى . كما أنه ليس من الطبيعي أن تدوم الحرب إلى الأبد بين نظريتين إحداهما غريبة فعلاً عن الأخرى في سبيل سلسلة الحقائق نفسها .

ولكن ما الذي حل بالموجة والجسيم ؟ أهما على الدوام في حرب لاتنتهي ؟

من الجـائـز أن قصتنـــا تخفـي وراءهـا وحدة دفينـة ؟ ولربمـا كانت هذه المعركة واحدة من تلك المعـارك المعهودة ؟ فلندرسهـا إذاً عن كثب : لقد نبعت أفكار هيزنبرغ وديراك من ديناميك هاملتون الجسيمي ، كما نبعت أفكار شرودنجر من ديناميك هاملتون نفسه التموجي . فهذا التعارض هيزنبرغ ـــ شرودنجر يحتمل إذاً أن يكون مجرد امتداد أو انعكاس لنزاع قديم بين الموجة والجسيم ، فأينما توجهنا ظهر لنا هذا الصراع نفســه وكأنه محور للعلم يدور حوله . ولكن هاملتون نفســه هو الذي بعث فينا الأمل بالمصالحة بين الخصمين . ومن الجائز أنه حين قرّب[1] بين نظريتي هيزنبرغ وشرودنجر في أصل مشترك ، جعلهما تقتربان كذلك من الموجة والجسيم ؟

ومـا أن مرت ثـلاثـة شـهـور على ظهـور نظـريـة شــرودنجر ، حتى قام هذا في آذار (مارس) ١٩٢٦ بخطوة حاسمة نحو الوحدة . لقد شعر من جديد أن عليه أن

---

(١) ليس هاملتون نفسه هو الذي قرب طبعاً ، بل أعماله في الميكانيك . (المترجم)

يبحث عن السر عند هاملتون . فهو الذي لم يقتصر على التلميح إلى هذا التماثل عند ابتكاره للديناميك البصرياتي ، بل فعل أكثر من ذلك ، إنه هو الذي استطاع أن يكتب معـادلة واحدة تصف سـير الأمواج الكاذبة مثلما تصف معادلة واحدة سير الأمواج الحقيقية تماماً . ولقد استطاع إذاً أن يحول علم الديناميك الكلاسيكي بمجمله إلى معادلة واحدة ، فكانت هذه مأثرة عظيمة .

لقد أضفى شرودنجر على أمواج هاملتون الكاذبة قدرة على التداخل . لذلك كان لابد أن تصبح بين معادلة هاملتون وبين معادلة شرودنجر التموجية رابطة من نوع ما . وهي رابطة مبهمة ، ولكنها تكفي مع ذلك لأن تحث على مواصلة البحث . وفي أحد الأيام المشرقة ، واتى شرودنجر الوحي ، وكشف له عن علاقة عميقة جداً ومثيرة إلى درجة لاتصدق . إذ لاحظ أن باستطاعته أن يحول المعادلة الأولى إلى الثانية بأسلوب رياضي عجيب في بساطته . وهي تتلخص في أن يضع مكان كل p في مادلة هاملتون كائناً رياضياً يدعى « مؤثراً » . ولاضرورة للخوف من هذا المؤثر الخاص الذي عنيناه . فالشيء المهم هو أن الخطوة التي تنقلنا من الميكانيك الكلاسيكي (معادلة هاملتون) إلى الميكانيك الكمومي (معادلة شرودنجر) هي أن نضع مكان كل p مؤثراً . وليس ضرورياً رؤية هذا المؤثر . ولكننا سنعرضه لمن يشاء أن يرى هل هو جميل حقاً مثل مفتاح الصول (إشارة التكامل) في حالة مدارات بوهر ؟ نعم ، إنه جميل وها هو :

$$\frac{h}{2\pi\sqrt{-1}} \quad \frac{\delta}{\delta q}$$

وفيه ترون من جديد الثابت h ، والجذر التربيعي لـ **ناقص واحد** وهذه الـ 2π ، **فهي** فعلاً أعداد لايمكن فصلها كما يبدو .

ولكن المؤثر في الرياضيات ليس عدداً ، وإنما هو أمر بإجراء عملية رياضية معينة . فمثلاً « اضرب بـ ٢ » أو « أضف ٣ » هي مؤثرات . وهذه المؤثرات يكتبها الرياضي بشكل مختصر أكثر من هذا ، ولكنه يعني بها دائماً الأوامر نفسها . وعندما يراد لمؤثرين أن يؤديا عمليهما بالتتالي ، يقال إن أحدهما مضروب بالآخر . وهذا

يتفق طبعاً مع فكرتنا المألوفة في حالة المؤثرات التي من الشكل « اضرب بـ ٢ » ثم « اضرب بـ ٣ » . لأن تنفيذ هذين الأمرين على التوالي يكافئ الضرب بجدائهما ٦ ، أي يكافئ المؤثر « اضرب بـ ٦ » . ولنبادر هنا إلى إعطاء مثال بسيط عن جدوى المؤثرات . فالضرب بـ **ناقص واحد** ، كما نعلم ، يغير إشارة الكمية الرياضية . فيمكن اعتبار هذا المؤثر بحق مكافئاً للأمر العسكري « إلى الوراء در » . فلنجرب الآن أن نبحث عن معنى « اضرب بالجذر التربيعي لـ **ناقص واحد** » . سنجد في الحقيقة أن هذا المؤثر من أكثر المؤثرات وضوحاً وبساطة وليس فيه أي سر عظيم ، لأنه سيعطي بعد تنفيذه مرتين متتاليتين ، نفس النتيجة التي يعطيها الأمر « إلى الوراء در » ، فهو يعني إذاً « إلى اليسار در » أو « إلى اليمين در » . وحتى هذا الالتباس بين يمين ويسار ، مناسب تماماً للمؤثر . لأننا نعرف أن الإشارة التي تسبق الجذر التربيعي لعدد ما ، تلتبس بين أمرين ، ولذلك نجد أن تمثيل الجذر التربيعي لـ « **ناقص واحد** » بهذه الصورة المحسوسة ، منتشر جداً في الرياضيات . فهو برغم بساطته ــ بل ربما بسبب هذه البساطة بالذات ــ ترك أثراً عميقاً في مجرى التفكير الرياضي .

ثم إن للمؤثرات خاصة معبرة لها دلالتها هنا ، إذ تبدو في مكانها المناسب تماماً . لنفرض أننا سنطبق على العدد ١ المؤثرين « اضرب بـ ٢ » ثم « أضف ٣ » . إننا سنحصل بعد الضرب بـ ٢ على ٢ ، وبعد إضافة ٣ ، على ٥ . ولكن إذا طبقنا المؤثرين بترتيب معاكس ، فإننا سنحصل ، بعد إضافة ٣ إلى ١ ، على ٤ ، وبعد الضرب بـ ٢ على ٨ ــ **فالجواب في الحالة الثانية يختلف تماماً عن الحالة الأولى** .

وهذه ، حتماً ، نقطة في غاية الأهمية . فإذا كان p و q مؤثرين فإن $p \times q$ و $q \times p$ ليسا بالضرورة متكافئين . وإذا حسبنا الفرق بين المؤثرين $p \times q$ و $q \times p$ (وهي عملية يستطيع عملها كل مبتدئ) سنجد أن النتيجة هي دائماً ذاتها ، بل إنها هي بالتحديد أيضاً تلك التي وجدت بحسب نظرية هيزنبرغ . فما فعله شرودنجر هنا هو أنه أعاد عمل ديراك نفسه ولكنه بلغة الأمواج بدلاً من الجسيمات ، وهذا ما لم يحل دون اعتبار اكتشافه الخاص مطابقاً كلياً للآخر . بل إن هناك ما هو أجمل من ذلك ، وهو أن

هذا التطابق يبرهن على أن نظرية ديراك بأكملها عن الكميات q مشمولة ضمناً في نظرية أمواج شرودنجر .

هذا ما كان عن ديراك وأعداده q ، ولكن ماذا بشأن هيزنبرغ ومصفوفاته ؟ الحقيقة أن شرودنجر لم يكن قد انتهى بعد من مهمته ، فقد استعان بطريقة رياضية ، بسيطة إجمالاً ، ثم استخدم كيانه ψ بكرم وسخاء ، فأظهر بذلك كيف يمكن تشريح الكميات p وq مع الكميات الأخرى المشابهة الموجودة في نظريته . وفي النتيجة ، كشف من خلفها عن عظام هيكلها الداخلي ، فأصبحت مكشوفة أمام الجميع . وما أن تم ذلك على الوجه الأكمل ، حتى ملأت تلك العظام جداول مربعة هائلة ، تبين فوراً أنها مصفوفات هيزنبرغ بحذافيرها .

فنظرية هيزنبرغ إذاً موجودة أيضاً في نظرية شرودنجر ، التي كنا نستطيع أن نتوقع لها هذه النتيجة مباشرة بعد أن ثبت ابتلاعها لنظرية ديراك ، لأن ديراك نفسه كان قد برهن أن مصفوفات هيزنبرغ تتستر خلف أعداده q .

وهكذا نرى كم تبدل منظر الفيزياء النظرية بعد ثلاثة أشهر أو يكاد من أزمتها الحادة . فنظرية شرودنجر بصورة أمواجها المألوفة التي يمكن معالجتها رياضياً بسهولة أكثر من نظريتي هيزنبرغ وديراك ، ابتلعت الآن كلياً منافستيها اللتين كانتا تشكلان هيكلها العظمي . وسهولة تمثلها أو تصورها ، لم تكن أمراً مذهلاً ، وإلا فمن يفضل العودة إلى المصفوفات والأعداد q ؟ بينما لم تعد تتعدى هذه المصفوفات والأعداد الآن كونها مستحاثات تشير إلى مراحل وسطى في تاريخ تطور الكم . لقد تجلت إذاً نظرية الكم أخيراً بتمامها . لقد فاز شرودنجر ، وكل شيء على ما يرام . وحانت اللحظة المناسبة لإنهاء الفصل ، فقد انتهى عصر الضوضاء ، وعم السلام في نهاية الأمر .

ولكن لا ، فتاريخ الكم ليس بهذه البساطة . لقد ضلت الفقرة الأخيرة طريقها وأيّ ضلال ، وأتى تعبيرها عن الفرحة في غير أوانه . فلايصح أبداً أن ننهي فصلنا هنا .

هناك وجه آخر للموقف . ألم يكن اكتشاف شرودنجر تأييداً لنظرية

ديراك بقدر ما هو ، تقريباً ، تأكيد لذاته هو ؟ حقاً إن شرودنجر كان لديه الروح ψ التي لايملكها ديراك . ولكن ديراك كان قد أكد مراراً أن جداول هيزنبرغ المربعة الهائلة ليست هامة جداً . ولقد اكتشف شرودنجر بالفعل أقوى مبرر ممكن لهذا التأكيد . إذ وجد أن مؤثراته لم تكن تماثل مصفوفات هيزنبرغ بشيء . فبعد أن اكتست هذه المصفوفات بلحم ψ ودمها ، تبين أنها تصبح مؤثرات بسيطة جداً وعادية . ولم يستطع شرودنجر أن يبرز هياكل ψ الهيزنبرغية إلا بعد أن شرَّحها رياضياً إلى أعمق أعماقها . إذاً ، قد تكون نظرية شرودنجر فعلاً ، قد ابتلعت نظرية هيزنبرغ (حسبما ذكر) . ولكن ، حتى لو تم هذا ، لما كان سوى تعزيز لإلهام ديراك الأول الذي سيبرز دوره عما قريب .

كانت الشهور التي تلت اكتشاف شرودنجر تفور بالنشاط . إذ كانت البيانات تتوارد من كل حدب وصوب عن انتصارات الأمواج والمصفوفات والأعداد q . فسرعان ما حُلت مغاليق الأمور الحساسة في مفعول زيمن ، وفُسرت كل تفاصيل مفعول ستارك بكل ما يكتنفها من تعقيد . وفي حزيران (يونيو) وجد هيزنبرغ تفسيراً رائعاً لكل التحديات التي طرحتها خواص طيف الهيليوم المضللة . بينما كانت نظرية بوهر تقف عاجزة أمام ألغاز هذا الطيف . وفي الوقت نفسه أعلن بورن عن اكتشاف جوهري أظهر أخيراً المعنى الحقيقي للروح ψ التي قال بها شرودنجر ، حتى أن هيزنبرغ نفسه بدأ يستخدم هذه الروح ψ .

وفي آب (أغسطس) طعم ديراك عظام نظريته عن الأعداد q بروح ψ ، فوجد أن هذه الأعداد مُستَقْبِل ممتاز لهذا الطعم . ثم روّض هذه النظرية لكي يلين أساليبها ، فبرهن أن الصعوبة في أسلوب شرودنجر للحصول على مصفوفات هيزنبرغ ، قد زالت الآن أو تكاد . ولم يكتفِ بهذا التمرين الصغير ، بل استفاد من أفكار هيزنبرغ حول طيف الهيليوم ، ليقدم تفسيراً لايزال حتى اليوم أقرب تفسير لمبدأ باولي الغامض الذي يمنع الإلكترونات من التجمع .

ولكن هذه الأعمال لم تكن أكثر من اختبارات أولية لقوة النظرية .

فالفكرة ستزيد من قدراتها زيادة لاحدود لها . ففي كانون الأول (ديسمبر) توصل ديراك من أعداده q ومن روحها ψ التي استعارها من شرودنجر ، إلى صيغة لاتزال إلى اليوم أوضح وأشمل صيغة لقواعد تلك اللعبة التي اكتشفها الفيزيائيون والتي تسمى ميكانيك الكم . وفي الوقت نفسه تقريباً توصل جوردان إلى هذه القواعد بمعزل عن ديراك .

ولكي نعطي هذه الإنجازات ما تستحقه من التقدير ، دعونا نرجع إلى قواعد تلك اللعبة القديمة جداً : الشطرنج . إن كراسة لايتجاوز ثمنها خمسة وعشرين قرشاً (وهذا فيا مضى طبعاً) ستعرض لنا هذه القواعد بأجلى وأوضح صورة في العالم . بل للحق نقول : ستشرح معها قواعد لعبة « الضاما » و« الدومينو » وكثيراً من ألعاب الورق غير المتداولة .

وسيعلمنا هذا الكراس كل شيء عن لعبة الشطرنج : أسماء القطع ، حركة كل منها ، بعض التفاصيل الدقيقة (كسقوط البيدق عند اجتيازه مجال بيدق الخصم) . وإذا أسعدنا الحظ فستشرح لنا شيئاًعن أبسط أساليب بدء اللعب ونهايات الأدوار الكلاسيكية . ثم ماذا بعد ذلك !؟ لاشيء ، فكل الأمور واضحة .

ولكن لا ، ليست كلها ، لقد أدخل الكراس في القواعد عنصراً ليس من الشطرنج . فالقواعد كما عرضها مغشوشة ، إنها مكتوبة باللغة الإنجليزية . ولكن ، هل تعد هذه الحجة صالحة حقاً للمطالبة باستعادة القروش الخمس والعشرين ؟ هذه خطيئة خطيرة جداً . فما صلة الشطرنج باللغة الإنجليزية ؟ إنها لعبة تمارسها شعوب العالم كله . فالشطرنج في فرنسة لايختلف عن بقية البلدان . بل إن الصينيين يلعبونها ، وكذلك الروس . فدعونا نعرض كراسنا على صيني أو على روسي . من المرجح أنه لن يبدي إعجابه إطلاقاً بوضوحه الذي يتباهى به . بل سيرد علينا برد مماثل ويلوح لنا تحت أنوفنا بكتيب صغير ، هو بالنسبة له جيد جداً ، وفيه تُشرح قواعد لعبة الشطرنج بطريقة ظريفة وبلغة صينية واضحة أو روسية صافية كماء النبع الرقراق .

إن قواعد لعبة الشطرنج المكتوبة باللغة الروسية ستبدو بالنسبة

لأمريكي عادي وكأنها بدون رابطة ظاهرة تربطها بهذه القواعد نفسها المكتوبة باللغة الصينية . ولكن حالما ينفذ روسي وصيني دوراً حقيقياً ، تصبح قواعد اللعبة واضحة[١] . فقواعد اللعبة تختلف ظاهرياً من لغة إلى أخرى ، ولكن اللعبة نفسها عالمية ومتحررة من كل قيود اللغة ، إنها كالموسيقى أو ألم الأسنان . والمفروض أن الوسيلة الشائعة لوصف الشطرنج تعتمد على رقعة شطرنج وجماعة من الأشخاص ، ثم يتم البيان العملي مقروناً بالإشارات . وهذا أمر طبيعي ، فما من وسيلة أخرى يمكن لشخص غير عالم باللغات أن يستعملها ليشرح لعبة الشطرنج أمام خليط من المهاجرين .

إن الطريقة المثلى لوصف كل فكرة عالمية هي الطريقة البدائية جداً التي لم تتطور كثيراً . خذ مثلاً ، رجلاً ترك على شاطئ جزيرة نائية . فما لم يكن هذا الشخص سيء الحظ ويؤكل فوراً ، فإنه سيتدبر أمره لكي يفهم الأهالي البدائيين بأنه جائع أو عطشان أو نعسان ، أو أنه يعاني ألماً عارضاً أو جدياً أو مبرحاً في معدته . إن الإشارات التي سيستعملها هذا الشخص (والمفهومة من الجميع) ستصبح بعد التعبير عنها بلغات العالم ، أصواتاً مختلفة من لغة إلى أخرى . ولكن هذا الجوع ، أو العطش ، أو الحاجة إلى النوم ، أو درجة الشدة في ألم المعدة . ستظل هي الحقيقة الأولى مهما اختلفت اللغات ولاسيما بالنسبة للشخص المصاب .

وهذا ما وجده ديراك ، فقد اكتشف خلف هذا الخليط من نظريات ميكانيك الكم الجديد ، الحقيقة الأولية والقواعد الأساسية للعبة التي لعبها الفيزيائيون . فقام بترجمتها إلى ما يكافئها في الرياضيات من لغة الرموز والإشارات . وهذه لغة بدائية حقاً في شكلها ولكنها مذهلة في دقة تعبيرها . وهذه القواعد ، على الرغم من أنها استخرجت من نظريتي هيزنبرغ وشرودنجر ، إلا أنها لاتبدي سوى القليل من آثار أصولها الأولى . فهي تحوي الأعداد q ، لأن ديراك ، كان قد تكهن بذلك عن حق منذ البدء . وهي تحوي كذلك روحاً ψ ليس بينها وبين الروح ψ عند شرودنجر سوى شبه بسيط جداً . وهنا سنفرد حديثاً صغيراً عن مصير هذه الروح الأخيرة .

(١) بصراحة اللعبة الصينية تختلف للأسف قليلاً عن لعبتنا . ولكن طرافة اللغة الصينية وسحرها هو ما دفعنا لاتخاذها مثالاً ،لذلك لايصح أن نترك هنة صغيرة كهذه تفسد مثالنا . فالحقائق قد لاتكون تماماً كما نشاؤها حسبما أشار يوماً أوليانوف ولكن حتماً ليس إلى هذا الحد .

إن التعبير عن قوانين ميكانيك الكم الأساسية بلغة الرموز الرياضية لايشكل سوى جانب من مآثر ديراك . لقد بين هذا الأخير كذلك كيف يمكن أن تترجم هذه القواعد إلى كل لغة رياضية قادرة على التعبير عنها . فلغة كلغة الحساب مثلاً ، كان شأنها شأن لغة أقوام أسترالية الأصليين ، غير كافية لأن تروي قصة الكم . وعندما دون ديراك قواعدها في إحدى هذه اللغات الرياضية ــ ولتكن مثلاً ما سندعوه اللغة الصينية الرياضية ــ أصبحت بكل بساطة نظرية هيزنبرغ مضافاً إليها روح ψ . وعندما دونها بلغة سندعوها مثلاً باللغة الروسية الرياضية، أصبحت نظرية شرودنجر بحذافيرها . حتى أن ديراك تخيل « قاموساً » عالمياً يساعد على الترجمات كلها من لغة إلى أخرى . وعندما كتب القاموس الخاص الذي يربط الروسية الرياضية بالصينية الرياضية ، أي نظرية شرودنجر بنظرية هيزنبرغ ، لاحظ أن هذا القاموس ليس سوى الأرواح ψ التي قال بها شرودنجر .

من هنا يتضح مدى التوحيد المذهل الذي حققه ديراك . فنظرية شرودنجر ، كانت قد تغذت بنظرية هيزنبرغ وظنت أنها ستبتلع نظرية ديراك . ولكن هاهي نظرية ديراك تبتلع الكل . وعلى كل حال ، فإن رفيقي الطريق الغريبين : شرودنجر وديراك ، تقاسما جائزة نوبيل لعام ١٩٣٣ . ولكن ميكانيك الكم (نظرية ديراك) لم يتقاعس ولم يهمل وضعه أبداً ، بل إنه أصبح مع الوقت أكثر رشاقة وأناقة ، وأصبحت بنيته الأساسية الآن مدعمة حسنة البناء .

ولكن ماذا يعني ذلك كله ؟ هل نستطيع أن نكون له في أذهاننا صورة ما ؟ لقد ظل ميكانيك الكم ، على الرغم من بلاغته ونتائجه التي لاتضاهى ، بعيداً غامضاً غير محبب .

وفيما كانت تجري هذه الأحداث ، اخترق هيزنبرغ حجب الضباب التي كانت تخفي أسسها النظرية . كما أن بوهر لم يتأخر عن إعطاء المزيد من الإيضاحات . ولن نتعرض هنا لوصف مملكة الفيزياء الغريبة هذه ، أو التي كانت تبدو هكذا ، فهذا ما سيرد في الفصول القادمة . ولن نتوقف كذلك لانتظار بعض

الإيضاحات . فهذا الفصل مخصص لمعالجة التوحيد ، وإذا كنا قد أنهينا لتونا وصف القسم الأول من سيرة هذا التوحيد ، فإن هناك أحداثاً مستعجلة وخطيرة ستضطرنا للتقدم فيها ، ولدينا الوقت الكافي لفهمها ، لذلك دعونا نتابع الحديث قليلاً عن التوحيد .

لقد اهتمت نظرية الكم الجديدة حتى الآن بالمادة وتركت الضوء يحسن من وضعه قدر ما يستطيع . وكان الضوء في أحسن حالاته لايتميز كثيراً في ذلك الوقت عما كان عليه في عهد بلانك وأينشتين وبوهر . وهكذا ازدهرت نظرية المادة فجأة ، بينما ظلت شقيقتها التوأم (نظرية الضوء) متخلفة عنها . وصار وضعها أشبه بوضع مراهقة في أوج السن الحرجة ، فظلت في وضع محير ،لا هو بالكلاسيكي ، ولا هو بالكمومي . وهذا الزغب الفوتوني الخفيف الذي كان يستر أواخر سماتها الكلاسيكية لم يقنع أحداً بأنها قد بلغت مرحلة النضج الكمومي .

ولكن سرعان ما نمت نظرية الضوء في هذا الجو المحموم الذي كان سائداً آنذاك ، ففي شباط (فبراير) من عام ١٩٢٧ ، وصلت على يد ديراك ، وبأسرع مما تحقق للجسيم ، إلى مرحلة النضوج الكامل .

دعونا نتخيل صندوقاً جميع جوانبه مفروشة من الداخل بطبقة من الزجاج (المرايا) . فالأمواج الضوئية ، التي تظل لسوء حظها أسيرة في هذا الصندوق ، ستمضي وقتها كله تهوي بجنون من هذا الجانب على ذاك دونما توقف ، فتصطدم بالجوانب الزجاجية ، وتنعكس عليها لامحالة بلا رحمة ولاشفقة .

في هذه الظروف القاسية جداً ، تسلك الأمواج المضيئة سلوكاً غريباً ـــ وهذا ما اكتشفه الفيزيائي جيمس جينز منذ عام ١٩٠٥ في أثناء أبحاثه عن كارثة الضوء فوق البنفسجي ـــ فهذه الأمواج المضيئة المحبوسة في سجن المرايا ، تشبه المجانين الذين يحسبون أنفسهم نابليون . فهي تزعم أيضاً أنها مجموعات من الجسيمات المهتزة . وقد برهن جينز بالفعل أن معادلات مكسويل المطبقة على هذا الضوء المحبوس في الصندوق المفروش بالمرايا ، يمكن أن تأخذ ، إذا ما أولت بمهارة ، شكل معادلات ميكانيك عادية

لهزازات (من قبيل ما تدعيه الأمواج عن نفسها) ـــ أو بالأحرى لعدد لامتناهٍ منها ـــ بدلاً من أن تظل على شكل معادلات أمواج عادية .

وهـذا الاكتشـــاف الذي حققــه جيــنز ، هو الذي اعتمـد عـليــه ديراك لبنـاء نظريتـه عن الضـوء ، وكذلك نظريته الأخرى عن تأثيره المتبادل مع المادة . فقد حول جينز معادلات مكسويل إلى معادلات تحوي الكميات p و q ، حتى لكأنها خرجت لتوها من ميكانيك هاملتون ، فكانت تلك فرصة رائعة لاتفوت . وعندئذ طعّم ديراك هذه الكميات p و q بأفكاره الخاصة الكمومية عن الأعداد q ، فحول هذا كله إلى نظرية كمومية عن الفوتونات تتضمن نتائج ذات مرامٍ بعيدة جداً . وهذه العمليات ، قد تبدو ، إذا ما ذكرت هكذا وحدها ، دون ملابساتها ، عملية بسيطة ، غير أنها في حقيقة الأمر عمليات شائكة مليئة بالمصاعب ، وتتطلب مهارة وحذقاً فائقاً . فهي تؤدي إلى إدخال كيـانات جديدة لاتشبه في شيء الكميات p و q البسيطة ، بل ليس لها في الميكانيك الكلاسيكي كله ما يكافئها . وكان لابد للسير فيها من امتلاك سيطرة تامة على زمام أفكار كثيرة وجديدة ، ومن جميع الأنواع ، سواء منها الرياضية أم الفيزيائية ، وذلك لسد الطرق بإحكام أمام المياه التي كانت تهدد بإغراق هذه النظرية في قاعها ، ومع ذلك لم تغلق كافة هذه الطرق . ولكن ديراك الذي كان واعياً لهذا الأمر لم يحاول السير بنظريته بعيداً ، ولم يتسرع ، لذلك نجح في إبقاء نظريته على السطح سليمة حية .

ثم ســرعـان مـا ألحق ديراك نظـريـة الضــوء المتخـلفـة ، بميدان ميكـانيك الكـم الجديد ليجعـلهـا رفيقـاً نداً لنظرية المـادة . وهكذا يعيد التـاريخ نفســه . فهذه الحادثة ، ليست في خطوطها العريضة ، سوى صورة لما حدث قبل عشر سنوات . ففي عام ١٩١٧ ، كان أينشتين هو الذي صالح نظرية التأثير المتبادل بين المادة والإشعاع ، مع نظرية بوهر الفتية . واليوم نرى ديراك يسدي المعروف نفسه لميكانيك الكم الجديد .

ولكن الحديث عن أهميــة نظـريـة ديراك في الضــوء ضـمن الإطـار العــام لميكـانيك الكـم ، والتطورات المعبرة التي أدت إليها ، هو حديث قد يبعدنا جداً عن موضوعنا الأساسي . غير أن هناك نقطة تكتسي أهميتها الخاصة من كونها تساهم في عملية

التوحيد الأقصى . وهي أن ديراك استطاع أن يستنتج شيئاً كان قد ظل حتى ذلك الحين بعيداً عن متناول النظريات ، وهو مختلف الأفكار التي أدخلها أينشتين قبل عشر سنوات بالاعتماد على حجج عامة ، وكذلك دستور بلانك الأصلي التجريبي عن الإشعاع ، وهو الدستور الذي نشأت منه كل هذه المسألة برمتها . وقد استخدم ديراك لأجل ذلك كل وسائل نظرية الكم القديرة ، التي هي على كل حال جزء مرتبط عضوياً بهذا الميكانيك .

وهنا ، عندما ظهر دستور بلانك الخالد للمرة الثالثة ، بارزاً كصخرة في وسط بحر صاخب ، سليماً صامداً رغم عبء السنين ، أغلق الكم حلقته . فهاهي إذاً لحظة إنهاء الفصل قد حانت .. ولكن لا ، فحتى هذا الفصل نفسه ، ربما ظل لديه شيء يقوله .

بالفعل ، فما زالت هناك عناصر متناثرة تحتاج إلى تجميع . منها مثلاً أمواج دوبروي ، فما الذي حل بها بعد كل هذه التطورات ؟ ثم ماذا أيضاً عن النسبية ؟ وماذا عن سبين الإلكترون ، وكذلك دستور سمرفيلد النسبوي المتعلق بالبنية الدقيقة ، فقد غاب هذا الدستور عن الأنظار في هذه العاصفة الأخيرة ؟

إذاً لازال أمامنا عمل آخر يجب أن نؤديه ، وهو وصف اندماج يجمع كل هذه العناصر في تحالف واحد .

إنها حقاً عناصر مشتتة متنافرة ، فبينما استعمل دوبروي موجات نسبوية في مكان وزمان عاديين ، استخدم شرودنجر أمواجاً غير نسبوية في فضاء خيالي . فأدى نجاح نظرية شرودنجر الباهر بعد حين إلى الظن بأن نجم دوبروي قد أفل . ولكن إحياء دستور سمرفيلد بدون النسبية وبدون السبين ، كان أمراً مستحيلاً . وقد جرت فعلاً محاولات عدة لأن يُستبدل بأمواج شرودنجر أمواج نسبوية ، ولكن دستور سمرفيلد استعصى على الظهور بأي أسلوب بديل . فبدت نظرية شرودنجر عند هذه النقطة الدقيقة متخلفة عن أداء وظيفتها ، حتى أنها بدت أكثر تخلفاً من نظرية بوهر .

في هذا الوقت ، ظهرت مشكلة جديدة ، فإذا كان الإلكترون موجة كما يؤكد شرودنجر ، فكيف يمكن أن نرفقه بسبين ؟ هنا تصدى باولي لهذه المسألة ،

كما تصدى لها بمعزل عنه الفيزيائي الإنجليزي س . ج . داروين حفيد شارل داروين صاحب نظرية الإصطفاء الطبيعي . وقد اتبع باولي نهج هيزنبرغ ، فخطر له أن يظهر أثر السبين عن طريق مصفوفات أدخلها لهذا الغرض . بينما لجأ داروين (الذي كان متآلفاً مع أفكار شرودنجر) إلى إدخال موجة إلكترونية معدلة . ولن نفاجأ ، بحكم ما عودنا ميكانيك الكم ، عندما نكتشف أن النظريتين كانتا متشابهتين تشابه اللغتين « الروسية والصينية » (في شرح لعبة الشطرنج) كما برهن جوردان . وإذا ما عمدنا ، ولو بشكل مصطنع ، إلى تركيب هذه الأفكار الجديدة مع النسبية ، نجد أنها ترد عندئذ لدستور سمرفيلد مكانته في عالم الفيزياء ، هذا فيما عدا اختلالاً بسيطاً . ولكنه كان يعاني أيضاً من ألم أخطر ، لأنه كان يفضي عند حساب مقدار معين إلى قيمة هي ضعفا القيمة التي تكشف عنها التجربة .

وحينذاك ، أي في عام ١٩٢٨ ، استلم ديراك زمام الأمور ، وعاد مباشرة إلى دوبروي والنسبية ، تاركاً السبين ينتظم من تلقاء نفسه . إذ لاحظ ديراك ببصيرته الثاقبة في ميكانيك الكم ، أن المعادلة التموجية البسيطة التي قال بها دوبروي يجب أن ينظر إليها من وجهة كمومية على أنها كيان مزدوج له جزآن .

إن جزأي هذا الكيان مرتبطان ارتباطاً حمياً ، حتى أن أحداً لم يلاحظ حتى ذلك الحين ثنويتهما . وهنا فصل ديراك بمهارته الرياضية الفائقة بين هذين الجزأين ، وتحقق أن لكل منهما مصفوفات مندمجة (جزئية) تمثل بالضبط سبين الإلكترون . كما برهن أن هذا الجزء أو ذاك الآخر كان يؤلف بمفرده معادلة موجية كافية للإلكترون ، وأن هذه المعادلة الجديدة لاتعيد دستور سمرفيلد سليماً إلى كنف الفيزياء الكمومية فحسب ، بل إنها تعدله إلى الأحسن . كما أنها تخلص النظرية من عيب القيمة المضاعفة التي كان ظهورها محتماً . وقد برهنت أيضاً أن سبين الإلكترون ليس سوى انعكاس طبيعي للنسبية ، فأنهت بذلك مشكلة التعارض الظاهر بين النسبية وبين السبين بشأن مسؤوليتهما عن البنية الدقيقة في الطيف . ومن الوجهة الرياضية ، أدخلت هذه المعادلة في نظرية النسبية كميات جديدة أدت إلى اكتشاف حساب جديد دعي إكراماً للسبين بالحساب السبينوي . وقد حلت محل معادلة شرودنجر في حالة إلكترون وحيد .

وأدت إلى تطورات ذات دلالة كبيرة سنتحدث عنها في فصل آخر ، ونخص بالذكر أنها هيأت الفرصة لاستشفاف النتائج العجيبة التي ستنتج عن الزواج الناجح بين هذين الثائرين في الفيزياء الحديثة : نظرية الكم ونظرية النسبية .

على أن هذا التزاوج الناجح بين الثائرين كان زواج مصلحة أكثر منه زواج تآلف ووفاق . فعلى الرغم من عظمته وقدراته على النفاذ بعمق إلى عالم المجهول ، إلا أنه لم يربط النسبية بميكانيك الكم برابطة حميمة . لذلك ظل عدم التآلف بينهما يعيق حركتهما . فلم تكتشف مثلاً الطريقة السليمة لتطبيق المعادلة الجديدة على ذرة لها إلكترونان أو أكثر . فظهرت مشاكل عديدة لها علاقة بهذا الواقع المزعج ، وكانت هذه المشاكل تزداد حدة كلما أصبح نجاح هذا الزواج باهراً . ومن هذه المشاكل ، مشكلة الطاقة السالبة التي كانت فعلاً محيرة . ولكن الحديث عنها سيرد في فصل آخر من قصتنا . لأننا على ما يبدو انسقنا مع اندفاعنا إلى أبعد مما يجب . وفي عام ١٩٢٨ كانت قد انتهت ثورة ميكانيك الكم ، وأخذت الأفكار البديعة والاكتشافات الرائعة تواظب على الظهور . ولكن قلاقل الثورة ، كانت قد خفت ، واعتلى ميكانيك الكم عرش السيادة ، واعترف به من الجميع على أنه الرائد والمشرع في دنيا الذرة . أما الآن فعلينا أن نعود مرة أخرى إلى الوراء لكي ننغمس من جديد في معمعان هذا الاشتباك ، فما زالت هناك أمور تروى .

١٣ ــ نهاية غريبة

ماكبث : « هذه قصــة يرويها أحمق ، مليئـة بالضجيج والغضب ، ولاتعني شيئاً » .

(ماكبث : الفصل الخامس ــ المشهد الخامس)

بولونيـوس : « على الرغم من أن هذا ضرب من الخبـل ، إلا أنه لايخلو من منهج » .

(هاملت ــ الفصل الثاني ــ المشهد الثاني)

ماكبث أم بولونيوس ؟ هذه كل المشكـلة . فقصتنـا كانت غنية بالضجيج والغضب ، والاضطراب العقلي ، حتى أن قراءنا قد يظنون أن من يرويها أحمق . إلا أنها لاتخلو من منهج . وهي ليست عارية من كل معنى .

ولقـد جـاء تفهـم نظرية الكـم الجديدة متـأخراً جداً . فالعـلمـاء كانوا قد ارتفعوا بالكم إلى مراتب شاهقة دون أن يدركوا معناه . وقد عملوا وملؤهم شعور بأنهم يعيشون أحداثاً لها ما بعدها . وكان تحسسهم لمعنى اكتشافهم ، غامضاً غموض تحسس اليرقانة بمستقبلها بأنها ستصبح فراشـة . ومع ذلك فعندما أخذت تباشير الفهم الأولى تأخذ طريقها إلى عقول العلماء ، كان هؤلاء قد سجلوا فعلاً بعض الانتصارات .

ولربمـا كان تـأخر الفهــم إلى هذا الحد أمراً طبيعيــاً ، لأن غرابـة المفــاهيم الجديدة عرقـلت عمــليــة التســليم بهـا ، حتى لقد كان إهمالها شبـه مؤكد لولا هذا العدد الطاغي من الشواهد التي تؤيدها . ولقد رأى العلم نفسه مرغماً على التسليم بها ، حتى دون مشيئته ، نظراً للانسجام المنقطع النظير بين النظرية وبين التجربة .

ولقد استلزم الأمر هجر فرضيات الأيام السالفة وآمالها وكل تصوراتها العقلية . فمثلاً ، ما الذي يمكن أن يكون أيسر استساغة من الطريقة التي حل بها دوبروي مشكلة الموجة ـ جسيم ؟ فعند دوبروي ، يتمثل دور الموجة لا في أنها بديل للجسيم ، بل في أنها تابع ملحق به . ولابد للجسيم بالضرورة من أن يكون مصحوباً بموجة لاتنفصل عنه وتكون له بمثابة كشاف رائد يستطلع الطريق التي سيتبعها ، فتحضه على اتخاذ المسير الوحيد الذي يجعل الفعل أصغرياً . فأي مفهوم يمكن أن يبشر بحل سر الموجه ـ جسيم أعظم من مفهوم : موجه ـ زائد ـ جسيم ، كما تصوره دوبروي ؟ ولكن هذا الرأي لم تكتب له مع ذلك حياة طويلة ، فقد تبين بعد ذلك أن هذا السر « موجه ـ جسيم » أعمق برهافته من ذلك بكثير .

أما هيزنبرغ ، فقد أمل ، إذا ما تغافل على طريقة النعامة عن التكهنات والتأويلات ، أن ينعم بالسلامة والطمأنينة . لذلك تجنب كل الصور العقلية ، ولم يقترح أي تمثيل لما يمكن أن يجري داخل الذرة إلا إذا كان محققاً . لأنه كان يشعر بذلك ، أي بأن هذه الصور هي التي كانت السبب في سقوط نظرية بوهر . كما أن ديراك امتنع عن تصور أمثلة توضيحية ، وانصرف بحماس إلى نظريته عن الأعداد q غير عابئ ظاهرياً بافتقارها إلى حرارة الصداقة الإنسانية (نظراً لتجريدها وبعدها عن الحس المألوف لدينا) .

وأما شرودنجر فقد أبعد أمواج دوبروي عن ملاعبها في المكان والزمان ، بأن نأى بها إلى أقاصي الفضاء الخيالي ، وعزلها بذلك عن رفيقها الأول : الجسيم . وهكذا لم يعد حتى بالإمكان تحديد موضع لإلكترونه (الذي بهت الآن حتى كاد يتلاشى) في الفضاء الخيالي . وبهذه المناسبة ، دعونا نروي حادثة صغيرة : حين لاحظ شرودنجر أحزان موجته على فقدان رفيق ملاعبها ، حاول أن يجسده لها بأن بنى لها ، من تراكم موجات صغيرة ، موجة هائلة ذات موضع . حتى لقد برهن رياضياً أن هذه « الحزمة من الأمواج » يمكن أن تحل تماماً محل الجسيم ، وأنها لايمكن أن تتفكك ، وتنتقل بالضبط كما كان ينتقل جسيم في الميكانيك الكلاسيكي . ولكن هذا الأسلوب في تعزية الموجة ، أخفق للأسف ، لأن هناك من أتى ليبرهن أن شرودنجر كان قد درس النمط الوحيد

للمسألة الذي يكون فيه لحزمة الأمواج سلوك مناسب . وكانت مصادفة غريبة فعلاً ، لأن الحزمة في سائر الحالات الأخرى تقريباً تتفكك . مما يعني إذاً أن فكرة شرودنجر عن توضع الإلكترون غير صحيحة ، ولكن هذا الموضوع لايزال فيه ما يقال أكثر مما يتراءى الآن ، لذلك سنعود إليه فيما بعد .

وبعد أن أدخل شرودنجر نظريته بأشهر عديدة ، وكان يطبقها في أثنائها بنجاح مشهود ، ولاسيما أنها امتصت منافساتها ، غامر أخيراً بأن تقدم باقتراح لتأويل موجته ψ ، فقال إن ψ تقيس الطبقة التي يشكلها الإلكترون المتبدد مثلما يمكن أن تقاس إلى حد ما ، طبقة الزبدة غير المتساوية السماكة والممدودة على شريحة من الخبز . وقد تقدم شرودنجر بدستور رياضي دقيق لقياس هذه الطبقة . ولكن سرعان ما تخطوا هذا التأويل مع الإبقاء دائماً على الدستور .

وفي حزيران (يونيو) ١٩٢٦ ، تقدم بورن باقتراح يقول إن : الإلكترون بعد كل حساب ، لايتبدد ، وإنما تقيس ψ احتمال أن يكون الإلكترون في موضع معين من الفضاء . وهنا نجد أحد الفيزيائيين الأميركيين الشبان يناقش هذا الرأي . وهذا الشاب هو ج . ر . أوبنهايمر **J.E,Oppenheimer** (رئيس اللجنة التي أشرفت على صنع أول قنبلة ذرية ألقيت على هيروشيما) .

إذاً لم نكد نهيئ أنفسنا لفكرة أمواج تتراكم ، لتمثل إلكتروناً باهتاً ، حتى طلب إلينا أن نضع مكانها أمواج احتمال . فكم من هذه الأفكار الشاذة يا ترى علينا أن نتحمل أيضاً قبل أن نصل إلى فكرة جيدة مقبولة ؟ وحتى حين نصل إلى هذه الفكرة الجيدة ، هل ستتمكن على الأقل من التعرف إليها عندما تظهر للوجود ــ هذا إذا ظهرت ؟

ولكننا الآن أمامها ! فأمواج شرودنجر هي أمواج احتمال . أو هذا على الأقل هو التأويل المقبول حتى الآن ، ولاشيء يشير إلى ما يستوجب تركه بعد حين . إنه بالفعل فكرة تعد من أساسيات تأويل ميكانيك الكم التي دعمتها أقوى الاختبارات التجريبية . وهي على الرغم من ذلك ، مفهوم مثير للدهشة حقاً ، ولكن لابد

أن بورن قد أحس بدافع مدعوم بحجج دامغة لكي يتبناه ، وإلا ما الذي يمكن أن يدفعه إلى التخلي عن فكرة شرودنجر القائلة بإلكترون باهت .

إن ما قاده إلى هذا التأويل الجديد ، هو تفكيره في ما سيجري لو أن الإلكترون شارف على الاصطدام بإحدى النوى . فعندئذ لو اعتبر الإلكترون موجة ψ (بسي) ، لشتت الاصطدام ــ كما ترون ــ الموجة ψ حول النواة .

ولكن لايبدو حتى الآن أي ضرر في أن تتشتت الموجة ؟ هل في هذا ما يسيء ؟

الحقيقة أن هناك إساءة بالغة ، إن الموجة ψ من حيث كونها موجة ، يمكن حتماً أن تتبدد بالطريقة التي تكون أكثر ما يناسبها . ولكن ما الذي يعنيه ذلك بلغة الإلكترونات ؟ هل يعني أن الإلكترون قد تحطم إلى آلاف القطع ؟ إن التجربة واضحة في هذا الشأن ، فالإلكترونات لاتتفتت إلى أجزاء بهذه الطريقة . كل ما في الأمر أن مسارها ينحرف إذا احتكت بنواة . وهذا صحيح ، ولكنها تظل سليمة تامة ، مع أن فكرة شرودنجر تتضمن أن الإلكترون لايمكن أن يخرج سليماً من الاصطدام . الأمر الذي يشكل وضعاً مستحيلاً لإلكترون باهت . ولم يكن ثمة مخرج من هذا المأزق ، كما يبدو ، سوى أن ينظر إلى ψ لا على أنها تصف سلوكاً خاصاً بإلكترون وحيد ، بل على أنها تشير إلى ما يمكن للإلكترون أن يفعله وسطياً عند وجود عدد كبير جداً من الاصطدامات .

وهذه طبعاً فكرة صعبة (ليس من السهل قبولها) ، لذلك قد يحسن الانصراف عنها إلى أفكار أخرى غيرها علها تساعدنا على فهم أوضح لهذا التأويل . وريثما تظهر هذه الأفكار الأخرى ، ستظل موجات الاحتمال ، وكل المفاهيم الأخرى تقريباً ، المرتبطة بتأويل ميكانيك الكم الجديد ، تولد إحساساً بعدم الارتياح الشديد عند جميع الفيزيائيين ، ما خلا بعض المحظوظين . وحتى هؤلاء، المحظوظين ، الذين كانوا في طليعة هذه المسيرة نحو التقدم ، تنفسوا الصعداء لدى ظهور هذه الأفكار الجديدة . والحقيقة أننا ندين في الدرجة الأولى إلى عبقرية هيزنبرغ بتفهمنا لمدلول ميكانيك الكم المتداول المألوف . وكذلك بقدرتنا على تصور سيروراته بطريقة مجازية ميسرة . علماً بأن

هيزنبرغ كان قد رفض إغراءات الصور العقلية ، ومال بطرفه عنها خوفاً من أن تدفعه إلى الزلل . وسنرى عما قريب أي غريزة سديدة كانت لديه ، وأي إلهام قوي . إذ برهنت الأفكار الجديدة فعلاً على أن جميع التصورات التي أمكن تخيلها في السابق كانت كلها بلا أدنى ريب مغلوطة إلى أبعد حد .

ولكن هيزنبرغ ، ككل أولئك الذين كانوا على علم بما يجري في الفيزياء النظرية ، أحس بالارتباك والقلق تجاه هذا التعارض الهائل بين وضوح نتائج المعادلات الجديدة ، وغموض تأويلها الأساسي وريبه .

ومما يروى في هذا المجال أن رجلاً أصلع سأل في أحد الأيام صبياً صغيراً : أيود هو أيضاً أن يصبح أصلع مثله بدون شعر يحلقه ، فأجاب الصغير بتوقد الذهن المعروف عند الأطفال : آه ! لا ، وإلا سيكون لدي وجهان ، وعليّ آن أغسلهما يومياً » فهذا الطفل كان يعرف حق المعرفة طريق المشاكسة الأساسي الفطري الذي يعد طبيعياً عند أولئك الذين يريدون التهام كل شيء (البيضة وقشرتها) . وهكذا كان على هيزنبرغ أن يكتشف تعنتاً مماثلاً في حقل الفيزياء . فبدأ أول ما بدأ بأن طرح على نفسه أسئلة جوهرية ، فقال لقد أحسنا صنعاً حين أكدنا بأن اختلاف $p \times q$ عن $q \times p$ يفسر الظواهر الذرية ، ولكن هذا التأكيد لايفسر سبب اختلاف $p \times q$ عن $q \times p$. وحتى لو اعتبرنا p وq مؤثرين وتبين لنا أن هذا السلوك (الاختلاف) أمر محتم ، إلا أن هذا ليس تفسيراً ، لأنه حقيقة رياضية بحتة ، فأين تعليله الفيزيائي ؟ وأين مدلوله التجريبي ؟ ذلك أن p وq ليسا مجرد رمزين رياضيين ، بل المفروض أنهما يمثلان كيانين فيزيائيين ، فالرمز p يمثل كمية الحركة (الاندفاع) وq تمثل الوضع . فالسؤال إذاً : ما الذي يعنيه اختلاف $p \times q$ عن $q \times p$ بلغة الاندفاع والوضع الحقيقيين ؟ وما الذي يعنيه من الوجهة التجريبية ؟

وهنا ، كانت هذه الفقرة الأخيرة ، هي الطريق التي أدت للإجابة : ففي عام ١٩٢٧ اكتشف هيزنبرغ هذه الإجابة بأن استنتجها من لغة الرموز في ميكانيك الكم ، ثم وضح معناها بأمثلة ملموسة مستوحاة من التجارب الفيزيائية العديدة المعبرة جداً . وفي الوقت نفسه فهم ديراك طبيعة الأمور على حقيقتها تماماً . وأما

بوهر فسرعان ما أدرك المغزى العميق في هذه الأفكار الجديدة . فدعونا نرى إذاً كيف يمكن أن نوضح هذه الأفكار بأمثلة ملموسة مستوحاة من هيزنبرغ وبوهر . ولنز مثلاً ما الطريقة التي نتبعها فعلاً لقياس p و q في حالة جسيم ما وليكن الإلكترون .

إن الأمر بسيط ، ما علينا إلا أن نراقب الإلكترون وندون وضعه وسرعته . والوضع يشار إليه بـ q ، وسرعة الإلكترون مضروبة بكتلته التي نقيسها بتجربة أخرى تعطينا الاندفاع الذي نشير إليه بـ p . ولكن كيف نجد وضع الإلكترون ؟ طبعاً بالنظر إليه . وكيف نجد السرعة ؟ أيضاً بالنظر إلى الإلكترون مرتين متتاليتين كما نفعل مع متسابق في مباراة الجري ، إذ ننظر إليه عند انطلاقه ، وكذلك بعد مرور فترة من الزمن ، ونسجل تغير وضعه . فأين الصعوبات في ذلك ؟ كل شيء واضح ، وهذا عمل يتم كل يوم . فالفلكيون يقيسون الأوضاع والسرعات منذ قرون ، فلماذا لانلجأ إليهم فهم على استعداد لأن يقولوا لنا كيف نحصل على هذه النتائج بدقة تكاد لاتصدق .

لابأس ، فهذه العمليات تطبق منذ قرون على الكواكب والنجوم والسدم وأشباه النجوم والأقمار والشهب . وعلى مستوي الأرض ، تطبق على القطارات والطائرات والسباحين وخيول السباق والقذائف . ولكن ماذا عن الإلكترون ؟ إن الإلكترونات صغيرة ، وصغيرة جداً ، بل هي في غاية الصغر ، ولكي نجري عليها قياساتنا يجب أن نراها ، فما العمل لأجل ذلك ؟

قد يقول قائل إن لدينا دائماً إمكانية استعمال المجهر .

ولكن المجهر مهما بلغت قوته فلن يكون قوياً بما يكفي .

لابأس ، نستطيع أن نتخيل دائماً مجهراً قوياً بما يكفي ، ولنز مانتيجة ذلك ؟

إننا حتى لو استعملنا مجهراً خيالياً ذا قوة خارقة ، فستظل تواجهنا مشكلة رؤية الإلكترون .

وهذا محتم .

لكي نرى الإلكترون علينا أن نضيئه .

أفي ذلك شك ، إنه واضح مثل نور الشمس ، ويعرفه الجميع بدون استثناء ، وما من أحد سيعترض عليه أبداً ، فلنباشر العمل .

هـانحن نبـاشـر فعـلاً . ولكن توجد قـاعدة معـروفـة جداً عن المجـاهر ، مفـادهـا أن قوة المجهـر محدودة بطـول موجـة الضـوء المستعمـل . فالمجهر لايمكن أن يميز بين تفصيلات أصغر من طول الموجة المستعملة . وإلا لماذا تستعمل أقوى المجاهر الضوء فوق البنفسجي لولا هذه القاعدة ؟ ولماذا كانت المجاهر الإلكترونية أقوى بكثير من المجاهر العادية لولا أن السبب في ذلك ، أن طول موجة دوبروي في حالة الإلكترونات السريعة أصغر بكثير حتى من طول موجة الأشعة فوق البنفسجية ؟

ولكـن مـادام مجهـرنـا افـتراضيـاً محضـاً ، فـلمـاذا لانستعمـل ضـوءاً افتراضيـاً أيضـاً ؟ فلنستعمل إذاً الأشعة السينية إذا لزم الأمر ، أو الأشعة التي يطلقها الراديوم (وموجتها أصغر من السينية) ، أو ضوءاً طول موجته أصغر أيضاً من هذا كله . فلنستعمل إذاً الضوء الذي نحتاجه بصرف النظر عن طول موجته ، فهذا لن يكلفنا شيئاً مادام الأمر خيالاً بخيال .

والآن كل شـيء جـاهز ، فـلنستعمـل إذاً ضـوءاً طول موجتـه في غـايـة الصغر . ولكن هنـا أيضـاً توجد قاعدة مشهورة عن الضوء . فكلما كان طول الموجة صغـيراً ، كان تواتر الضوء أكبر . وتبعاً لاكتشـاف بلانك وأينشتين : كلما كان تواتر الضوء أكبر كانت طاقة فوتوناته أكبر .

ما هذا ؟ لقد عدنا إلى استعمال الفوتونات ، وهل هذا مجال لاستعمالها ؟ لقد كنا نتحدث عن المجهر ، فما الفائدة من تعقيد المسألة والعودة بنا إلى الفوتونات ؟

ولكن لا ، يجب أن نستعمـل الفـوتونـات مـا دمنـا نريد التفكـير بـلغـة الكـم ، وهذه هي النقطـة الجوهرية التي أهملت في كل التـأملات المـماثلة السـابقـة . فنحن نعرف أن الضوء يمتاز بشكل من أشكال الذرية ، وان كل تواتر ، يبدو على شكل

حزم محددة تماماً من الطاقة ، فكيف يمكن أن نتجاهل حقيقة أساسية كهذه إذا أردنا أن نفهم الكم ؟ ولكن ما هذه الهزة التي تصدر فجأة عن مجهرنا ؟ يبدو أن الإلكترون لايستطيب هذا التطفل عليه ولايحب هذا التغيير الذي انجرفت فيه الأحداث . لقد أظهرنا له كل ألوان المضايقة ولم يعد يعرف الهدوء . إذ لم نكتفِ بالنظر إليه بل قذفناه بقذائف هائلة من الطاقة أزعجته أيما إزعاج . فهل تستحق هذه التجربة بعد ذلك أن توصف بأنها علمية . إنها تفتقر إلى أدنى حدود الرقة واللطف . افرضوا أننا نجحنا برؤية الإلكترون وحددنا موضعه . إن هذا النجاح سيكلفنا غالياً . فالقول بأننا رأيناه يعني أننا صدمناه مباشرة بفوتون . ولكن الإلكترون جسيم **خفيف جداً** ، وغير قادر على الصمود أمام جسيم ضوئي ، لذلك فقد هزته الصدمة هزة عنيفة .. ومشاهدتنا له ، عرضته للاصطدام ، الأمر الذي غير من سرعته . إذاً نحن نسير في الاتجاه المعاكس للهدف الذي نسعى إليه . وفي الوقت نفسه لايمكننا استعمال فوتونات أقل خشونة . لأن طاقتها تضعف . وكلما ضعفت طاقتها ، انخفض تواترها . وازداد بالتالي طول موجتها . الأمر الذي يضعف من قوة مجهرنا . وهكذا نجد أن المصاعب تلاقينا أنى تولينا ، فكأن روحاً شريرة تسمم أجواءنا .

ولكن لم لانستفيد من الجوانب الجيدة في هذه التجربة ، فنلاحظ الوضع الأصلي ، ثم نقيس سرعة الإلكترون بعد صدمة مشاهدتنا الأولى له .

الحقيقة أننا بهذا العمل لن نتقدم خطوة واحدة . إذ كيف نحسب السرعة ؟ إن حسابها يحتاج لاستعمال كرونومتر تخيلي لكي نجري رصدين متتاليين لوضع الإلكترون ، ولكي نرى كيف تحرك . ولكن المشاهدة الثانية ستسبب صدمة ثانية . فهذه السرعة حتى لو قسناها بكل عناية ، فإنها لن تكون هي سرعة الإلكترون الحقيقية ، لأن الصدمة الثانية غيرتها في اللحظة نفسها التي شاهدناه بها . إننا نقدر أن نعرف سرعته السابقة ، ولكن ليس الحاضرة ولا المستقبلة . فروح المشاكسة أصبحت فعلاً وبالاً علينا .

ولكن لا ، هذه حماقة سخيفة ، هذا مستحيل ، لابد من وجود وسيلة للخروج منها . لماذا لانسجل الدفع الذي يقع على الفوتون نفسه . ثم نحسب الدفع الذي سيتلقاه الإلكترون كما نفعل مثلاً في حالة اصطدام كرتي « بليار » .

هذه فكـرة ذكيــة وعـاقـلة ولكنهــا للأسف لن تجدي ، لأن هنـاك قاعدة صـغـيرة تتعـلق بـالمجهـر كان قد نبهنـا إليهـا بوهر ، وهي أن طول الموجة ليس وحده المسؤول عن قوة الفصل ، بل إن قطر العدسة الجسمية هو أيضاً له دور هام . إذ يجب أن يكون كبيراً لكي تكون قوة فصل المجهر كبيرة . ولكن حين يكون هذا القطر كبيراً ، لانستطيع أن نميز بدقة الاتجاه الذي اتخذه الفوتون بعد اصطدامه مع الإلكترون . فمن الجائز أن يكون قد اجتاز أي جزء من العدسة الضخمة التي اضطررنا لاستعمالها لكي نحصل على قوة الفصل الكبيرة الضرورية . ذلك أن العدسات هي أشياء عجيبة . إنها تقرب جميع الأشعة الصـادرة عن الإلكترون على بؤرة واحدة ، فلا نستطيع أن نعرف بعدئذ اتجاه الشعاع عندما ننظر إلى خيال الإلكترون . فمبدأ المشاكسة لم يتوقف عن معاكساته . حقاً إنه كلما كبرت العدسة ازدادت قوة الفصل ، ولكن ارتيابنا في اتجاه الفوتون سيكون أكبر أيضاً ، وكذلك بالتالي بالنسبة للدفع الذي يمارسه على الإلكترون . فالنتيجـة هي أننا لانستطيع أن نعرف جميع المعطيات اللازمة لحسـاب الصدمات على طريقة كرات البليار التي تحدثنا عنها منذ قليل . فموقفنا على حاله لم يتبدل : عندما نرصد الوضع ، نفسد الفرصة المواتية لحساب السرعة . فهل من وسيلة أخرى نلجأ إليها ؟ يقول المثـل : إن المرق الصـالح للحسـاء يصـلح للثريد ، فالفوتونات التي استعنا بها هنا على مضض ، دعوها تنقذنا أيضـاً من هذه الورطة التي وقعنا فيها . فقد نستطيع إيجاد اتجاه الفوتون بقياس الدفع الذي مارسه على المجهر نفسه ؟

ولكـن لكـي نقـيس هـذا الدفع يجب أن نقـيس انتقــال المجهـر ، فبـأي طريقـة نقيســه ؟ هل ننظر إليه ؟ إن هذا يحتاج لإضـاءته . وإضـاءته تعني قذفه بسيل من الفوتونات ، الأمر الذي يتطلب فوتونات مزودة بطاقة كبيرة للغاية ، لأننا نحاول قياس انتقال لامتناه في الصغر . فمازلنا إذاً محاصرين بالصعوبات نفسها ، وكلما حاولنا توثيق ملاحظة أولى بثانية لإجراء قياس صحيح ، نحدث اضطراباً يبطل هذا الإعلام الجديد ، وبذلك ينفلت مبدأ المشاكسة متضاحكاً من أعمالنا ، فلا تجدي جهودنا كلها لتعيين وضع الإلكترون إلا بتبديد معرفتنا المحتملة عن سرعته . وكل ذلك بسبب كم بلانك h . وهذا تقريباً مبدأ هيزنبرغ الشهير باسم « مبدأ اللاحتمية » الذي ينص على أنه لامفر لنا من

التسليم بأنه يستحيل تعيين وضع الجسيم وسرعته بكل دقة وفي آن واحد ، حتى ولو في الخيال . ذلك أن وجود الكم يمنع عنا معرفة p و q معاً في آن واحد . فإذا قسنا p أحدثنا اضطراباً في q ، وكذلك إذا قسنا q ، أحدثنا اضطراباً في p . وهذا ما يمكن البرهان عليه بأن نتخيل تجارب افتراضية (كما فعلنا في الحالة الأولى) . والعقدة كلها تكمن هنا في أنه لاتوجد وسيلة لتعيين مقدار مضبوط لهذا الاضطراب . فإذا قنعنا بمعرفة قيمة تقريبية للوضع بدلاً من القيمة الحقيقية الدقيقة ، أمكننا عندئذ معرفة فيمة تقريبية للاندفاع ، وضمن حدود معينة . أما إذا ألححنا على معرفة أحد هذين المقدارين الوضع أو الاندفاع بكل دقة ، فإننا لن نعثر في هذه الحالة قطعاً ، على أي أثر من المعلومات عن الآخر . وقد اكتشف هيزنبرغ أننا إذا ضربنا الارتياب المتعلق بالوضع في الارتياب المتعلق بالاندفاع ، فإن هذا الجداء لن يكون في أحسن الأحوال أصغر من h . فها نحن من جديد أمام ثابت بلانك h ، ذلك الغدار .

لنقارن هذا الموقف بالموقف الذي كان سائداً قبل نظرية الكم . ففي ذلك العهد أيضاً كان عليهم أن يستعملوا ضوءاً ذا أمواج قصيرة جداً . وهذا الضوء كان يمارس ضغطاً . ولكن ، باستطاعتهم تخفيف شدة الضوء حسبما يريدون لكي يخففوا (بحسب ظنهم) دفعه في الوقت نفسه : الأمر الذي كان يسبب نقصاً في اضطراب الإلكترون . أما في البصريات الكمومية ، فإن تخفيف شدة الضوء لايخفف من صدمات الفوتونات الإفرادية ، بل يزيد الفاصل الزمني بين الصدمات ، مما يقلل من عددها . ومن المعروف أنه من غير الممكن مشاهدة أي شيء قبل ارتداد الفوتون فعلاً عن الإلكترون بعد صدمه . ولما كان نقصان شدة الضوء لايؤدي إلى نقصان طاقة الفوتون الواحد ، فالمشاهدة تتوقف على الصدمة . فالصدمة إذاً لم يعد ممكناً تجاهلها (أو تخفيفها وإهمالها في النتيجة كما كان يظن) . ولكن هذه الصدمة هي التي تظل أساساً غير معينة .

وهنا ، أي في هذه النتيجة ، نكون قد عثرنا على إحدى السمات المميزة للفيزياء الجديدة . ولا تزال هناك سمات أخرى غيرها تنتظرنا ، وهي أدهى منها . فنحن مازلنا حتى الآن لم نفسر كيف ترتبط هذه النتيجة باختلاف p×q عن q×p . ولكن دعونا نتمعن بعض الشيء في هذه الطرفة التي عثرنا عليها .

يجب أن نفهم قبل كل شيء أن هذه المناقشة كلها التي تصورنا فيها تجارب خيالية محضة ، لم تكن في الحقيقة أبداً أكثر من عرض عام ، يغلب عليه الغموض ، هدفه أن نتآلف مع مدلول نظرية الكم . إذ لاوجود لمجاهر تتمتع بهذه القوة الخارقة التي تخيلناها ، بل إننا لم نكن منطقيين مع أنفسنا . لأننا ، وإن بدأنا بالنظر إلى الإلكترون على أنه جسيم ، إلا أننا خلصنا إلى نتيجة مفادها أنه كان جسيماً من نوع غريب . والمبرر الحقيقي لهذه العمليات التي تخيلناها هو نجاح نظرية الكم نفسه ، أما هذه التجارب الخيالية فهي تأويل فحسب لقواعدها الأساسية .

لقد توصلنا إذاً إلى مفهوم جديد للجسيم ، وهو أنه ، كائناً ما يكون ، فإنه قطعاً لم يعد كما كنا نتصوره . فالجسيم قديماً كان يمكن أن يكون له وضع وسرعة في آن واحد . أما الجسيم بمفهومه الحالي فيمكن أن يكون له وضع ، أو سرعة ، أو وضع يغلب عليه الغموض وكذلك سرعة ضبابية ، ولكن لايمكن أن يكون له **وضع وسرعة** بدقة في آن واحد . ففي التجارب السابقة ، كنا تخيلنا الجسيم على صورة جسيم قديم ، ولكن تبين لنا حالاً أنه يستحيل في هذا الوضع الذي كنا فيه ، أن نلاحظ جميع صفاته المزعومة . فلابد لنا من الابتعاد بعد الآن عن هذا المفهوم القديم ، وإلا لظلت روح المشاكسة توقعنا في الفشل ما دمنا نصر على تمادينا في خطئنا . فأما وقد تبين لنا الآن استحالة ملاحظة الصفات القديمة ، حتى ولو نظرياً ، فما علينا إذاً إلا أن نخلص إلى أنه ليس لها وجود فعلي . فهناك إذاً « جسيم » من نمط جديد بدأنا نواجهه ، وهو مختلف جداً عن النمط الكلاسيكي . ولايمكن أبداً اعتباره حبيبة ضئيلة جداً من مادة مندفعة بحركة محددة . نعم ، يمكننا اعتباره : إما حبيبة ضئيلة من المادة ، وإما مندفعاً بحركة محددة ، ولكن لايمكن اعتباره الإثنين معاً . وهكذا أصبح واضحاً أن الصراع موجه — جسيم قد لبس الآن مدلولاً جديداً ، وهو ما سنناقشه فيما بعد .

وهناك جانب آخر للوضع الراهن للفيزياء علينا أن نراعيه . لقد أصبح العلم فجأة أكثر تواضعاً . ففي ما مضى من الأيام الجميلة كان باستطاعته أن يتنبأ بالمستقبل بجرأة ، أما الآن فهيهات . فلكي يتنبأ بالمستقبل يجب أن يعرف الحاضر ، والحاضرلايمكن أن يعرف بدقة ، لأن كل محاولة لمعرفته ، ستبدله لامحالة . فمثلاً ، إذا

عرفنا المدرج الذي ستقلع منه طائرة معينة ، وعرفنا كذلك سرعتها واتجاهها ، سهل علينا التنبؤ بمكانها في مستقبل قريب . ولكن إذا لم نعرف سوى المدرج ، أو سرعة الطائرة واتجاهها ، ولم نعرف الأمرين معاً ، فإن تنبؤنا سيصبح مجرد افتراض . وهذا حالنا مع الإلكترون. فالعلم قد مر إذاً بانقلاب جوهري عميق الجذور لدرجة يصعب تصورها ، ومن غير أن يعي ذلك منذ البدء . ولقد تابع طريقه من بلانك إلى هيزنبرغ دون أن يتبين تماماً مدى التغير الذي حل به ، وحتى قبل أن يفهم أن بنيته (أي بنية الفكر العلمي) كلها قد تغيرت معالمها . لقد دب فيه الهرم فجأة ، بعد أن جرد من أروع آيات مجده وعظمته ، وأغلى أوهامه عليه . لقد فهم أخيراً أنه لم يمتلك يوماً موهبة التنبؤ بالمستقبل بصورة مفصلة .

على أن العلم يتنبأ بالمستقبل ، وبنجاح لم يسبق له مثيل ، وذلك بفضل الكم ، وهذا موضوع لابد أن نعود إليه حتماً .

هناك أيضاً سؤال : ماذا عن مدارات بوهر ؟ ولو أننا راقبنا ذرة بوهر بالمجهر فما الذي سنلاحظه ؟ أمن الممكن متابعة الإلكترون على طول مداره أو حتى على طول جزء من مداره ؟ أبداً ، على الإطلاق ، لأن مشاهدتنا له ستوجه إليه صدمة تجعله يقفز بعدها من مداره إلى مدار آخر مسموح له به ، أو نقذف به أحياناً خارج الذرة . إذاً حتى لو سمحنا لأنفسنا بأن نتكلم عن المدارات كما لو أنها موجودة فعلاً ، لتبين لنا أنه يستحيل ملاحظتها بالمعنى الكلاسيكي للكلمة . فأي بصيرة ثاقبة هذه يتحلى بها هيزنبرغ ، لتجعله يتخلى عن هذه المدارات منذ البدء ؟

والآن بقيت مسألة واحدة نعود بعدها إلى قصتنا . إن الطاقة والزمن مرتبطان مثلما أن الوضع والاندفاع مرتبطان . وهذا ما كان يعرفه هاملتون حق المعرفة . وهنا حانت اللحظة المناسبة كي نشير إلى الحدث الخارق الذي طرأ عندما ربط بلانك بين الطاقة وبين التواتر . فالتواتر لايمكن حسابه بطرفة عين ، ولابد أن نتمهل قليلاً لكي نلاحظ هزة أو اثنتين على الأقل . إذاً ، ما دامت الطاقة مرتبطة بالتواتر ، فلايمكن حساب هذه الطاقة في لحظة واحدة ، بل لابد من مرور بعض الوقت . والآن ، لنقارن

ذلك مع اكتشاف هيزنبرغ بشأن الاندفاع والوضع . سنجد أننا أمام وضع مماثل تماماً : إذا عرفنا الاندفاع ، فلا يمكننا معرفة التوضع الصحيح تماماً في المكان . وكذلك ، إذا عرفنا الطاقة ، فلا يمكننا معرفة التوضع الصحيح في الزمن (أي لحظة قياس هذه الطاقة) .

إن هذا التماثل تام قطعاً . ولكن علاقة الزمن بالطاقة هي بالنسبة لنا ذات أهمية خاصة ، لأن اكتشافها لايحتاج إلى استعمال مجهر افتراضي . وكان المفروض أن تبدو لنا جلية منذ البدء لو كان لدينا الذكاء والجرأة الكافيان . إنها هناك ، تعلن طالبة من يعرفها منذ اللحظة التي ولد فيها الكم تحت رعاية بلانك . بل إن هذا الاكتشاف التاريخي كان يصيح ضارعاًلمن يميط عنه اللثام . وكان باستطاعة أي شخص أن يجده بكل سهولة ليحظى بعدئذ بمجد اللقب « عالم » . ولكن أحداً لم يأخذه على محمل الجد قبل العام ١٩٢٥ تقريباً ، لذلك تأخر كشفه (عن عام ١٩٠٠) ربع قرن[١] . ومن يدري ، فلربما كانت هناك اليوم أيضاً حقائق من هذا النوع ، واضحة جداً ، ولكنها محجوبة عن أنظارنا ، لذلك تظل مهمتها سرية لأن الناس لم يملكوا الجرأة والشجاعة الضرورية للكشف عنها ! إن الجرأة والشجاعة لازمتان أيضاً في العلم كما في المعارك .

والآن لنعد إلى قصتنا ، فمازال هناك عدد من الحقائق التي تنتظر الإيضاح . منها مثلاً قصة $p \times q$ ، فهل نستطيع أن نفسرها فيزيائياً ؟ وإذا أمكن ذلك ، فما صلتها بمجهر هيزنبرغ ؟

الحقيقة أن تفسيرها يتطلب منا العودة إلى قواعد لغة الرموز في ميكانيك الكم . لأن هذه القواعد هي التي ادت بالفعل إلى اكتشاف هيزنبرغ . والقارئ ، لم يفته حتماً أن قواعد ديراك ، على الرغم من كل ما أتيح لنا قوله في الفصل

(١) كون الطاقة ذرية متقطعة (غير مستمرة) ، هذا وحده كان يكفي لإظهار اللاحتمية . وقد نبه بوانكاريه إلى ذلك في كتابه « العلم والفرضية » قبل ظهور ميكانيك الكم بسنوات .

السابق ، لم تطرح بأسلوب دقيق واضح ، لأن الوضع لم يكن مناسباً لها . ولكن هيزنبرغ سبق أن مهد لنا الطريق . ونستطيع الآن أن نقدم دراسة وافية عن بعض تفصيلاتها لكي نرى بأي طريقة مدهشة استطاعت أن تحوي اكتشاف هيزنبرغ الثوري .

يقول ديراك ، إن الإلكترون والذرة والسديم والسيارة ، وبوجه عام كل منظومة ميكانيكية ، يمكن أن يكون لها عدة حالات مختلفة من الحركة كلها محتملة . وقد مثل كلاً من هذه الحالات الخاصة بالرمز ψ الذي سبق أن قلنا إنه شيء آخر غير ψ شرودنجر . والآن لنركز انتباهنا على الإلكترون الذي عرّضه هيزنبرغ (بغية ملاحظته) لوابل شديد من الفوتونات . فلكي نلاحظ وضعه ، نقوم بإجراء تجريبي يخصه ، وهذا الإجراء يجب أن نعبر عنه بطريقة أو بأخرى بلغة الرياضيات الرمزية ، وعادة نشير إلى هذا الإجراء الفيزيائي بالمؤثر الرياضي q . ولما كان الإجراء الفيزيائي سيغير ، كما نعلم ، من حركة المنظومة الفيزيائية ، لذلك أعددنا لهذا الأمر عدته بأن يُظهر المؤثر نتيجة التغير على شكل تبدل في ψ . فهل ثمة ما هو أكثر دلالة مباشرة من هذا الإعداد ؟ إنه فعلاً محاكاة مضبوطة للواقع الفيزيائي المرتبط به ، ولكنه مكتوب بلغة الرموز الرياضية .

وفي حياتنا اليومية ، توجد أمثلة كثيرة عن عمليات تتغير نتيجتها إذا غيرنا في ترتيب إجرائها . فمثلاً ، إذا جعلنا p تدل على أكل قطعة حلوى ، و q على الإمساك بها فإن q يمكن أن تسبق p ، ولكن ليس على العكس . وإذا جعلنا p تدل على غسل الشعر و q على حلاقته . عندئذ لا تختلف امرأتان في أن p يمكن أن تسبق q ، أما أن q تسبق p ، فهذا ليس مقبولاً أبداً عند النساء . وإذا كانت p تعني أن يرزق شخص بطفل ، و q أن يتزوج ، فواضح أن حالة q إذا تلت p تختلف عن حالة p تتلو q . وفي سائر هذه الحالات نقول إن $p \times q$ يختلف عن $q \times p$. وهذا تقريباً ما يجري في ميكانيك الكم .

لنفرض أن باستطاعتنا تحديد وضع إلكترون هيزنبرغ بكل دقة . ولنفرض أن هذا الوضع هو الذي تكون q عنده مساوية 3 . فعندئذ نستطيع أن نعوض عن المؤثر q بالعدد 3 و نقول إن $\psi \times q$ تساوي $\psi \times 3$. وهذه أعمال من أوليات

الرياضيات يستطيع حتى المبتدئ في الرياضيات أن يفهمها . ومع ذلك فإن قواعد ميكانيك الكم هي شيء مثل هذا .

والآن ، ما الذي يعنيه اختلاف $p\times q$ عن $q\times p$ بالنسبة لإلكترون هيزنبرغ ؟ إننا في وضع يساعد على فهم ذلك . وهو سؤال لايعدو كونه تمريناً تافهاً في لغة الرموز الرياضية ، بل أسهل حتى من الحساب البسيط . إنه تمرين لاشأن له سوى أن يدل على مدى هول الأحداث الكامنة خلف هذه القواعد البريئة الطيبة المظهر .

دعونا نتظاهر إلى حين بأننا وجدنا أن q قيمتها 3 بالتحديد ، وp قيمتها 5 بالتحديد . وذلك بغض النظر عن الحسابات التي سبقت ذلك . إذاً $p\times q\times\psi$ تصبح $5\times3\times\psi$ أي 15ψ في حين $q\times p\times\psi$ تصبح $3\times5\times\psi$. ولكن هذه الأخيرة أيضاً تساوي 15ψ . فهي مطابقة للنتيجة الأولى . غير أن هذه النتائج مناقضة بلاجدال لما نعرفه ، وهو أن النتيجة الثانية لاتتطابق مع الأولى . لأن الأولى نتجت عن $p\times q\times\psi$ بينما الثانية نتجت عن $q\times p\times\psi$. ونحن نعلم أن $p\times q$. تختلف عن $q\times p$. أو بكلمة واحدة لايمكن أن يأخذ p و q قيماً محددة تماماً مثل3 و5 ذلك لأن 5×3 يساوي 3×5 ويعطيان نتيجة واحدة .بينما نعلم أن هذا لا يسري على p و q . فمن الواضح إذاً أن هذا التناقض يعني أن المسلمة التي بدأنا بها كانت خطأ . ولابد أيضاً أن يكون اختلاف $p\times q$ عن $q\times p$ يعني أن الترتيب الذي نجري فيه ملاحظاتنا سينعكس عل النتيجة فيبدلها . وهذا إن دل على شيء فإنما يدل على أن ملاحظة أحد المقدارين ستشوش ملاحظة الآخر . الأمر الذي وضحه هيزنبرغ وبوهر بمجهرهما الخيالي .

وهنا أصبحت قصتنا مضحكة فعلاً . فكل ما قلناه حتى الآن لم يكن سوى مقدمة للثورة العظيمة التي أثارها ميكانيك الكم الجديد في الفكر العلمي . ذلك أن اكتشاف هيزنبرغ ، كان يحمل ما هو أكثر من مجرد استحالة معرفة الوضع والسرعة في آن واحد ، وما هو أكثر أيضاً بالنسبة لقواعد ميكانيك الكم . فقبل كل شيء يصبح يقيننا بالأشياء التي تقال ، موضع اختبار ، حتى ليوشك على القطيعة .ولكن مامن مخرج آخر ، فالتجربة لها القول الفصل . وما أن يمر بعض الوقت حتى ينتهي الأمر بنا إلى التسليم بالأفكار الجديدة على الرغم من غرابتها ، وإلى الإقرار بعدالتها المرجحة .

والآن لننتبه جيداً ولنشد على أعصابنا ، ولنهيئ أنفسنا لما ينتظرنا من أحداث . إن وضعنا أشبه بوضع طفل يبحث عن الحقيقة ، فلا يكف عن طرح أسئلته التي لازالت تطرح منذ بدء الخليقة .

إنه يسأل : « بابا ، من الذي ولد الأول ، الصوص أم البيضة ؟ » .

ونحن نرفض الإجابة بعناد اليائس من التفاهم . ولكن السائل يلح ويلح ، ولاترضيه سوى الحقيقة . وأخيراً عند فراغ صبرنا ، نستجمع شجاعتنا كلها ونطلق الرأي الرزين حول الموضوع . إنه باختصار :

ـــ نعم !

وكما هو الحال في قصتنا عن الصوص والبيضة :

ـــ « بابا ، أهو موجة أم جسيم ؟ » .

ـــ نعم .

ـــ بابا ، هل الإلكترون هنا أم هناك ؟

ـــ نعم .

ـــ بابا ، هل يعرف العلماء حقاً عما يتكلمون ؟

ـــ نعم .

بالفعل ، لقد أصبحت دربنا واضحة . فنحن نعلم من البدء ، أن قولنا جسيم لم يعد بحسب مبدأ هيزنبرغ ، كما كان . لابل سنكتشف أيضاً أن اختلافه عن نموذجه القديم ، أوسع حتى مما تصورناه إلى الآن .ولما كانت كلمة « جسيم » مشحونة بالالتباسات ، وملوثة بكل ما ارتبط بها من الصور الكلاسيكية عن الجسيم، لذلك نفضل أن نستعمل بعد الآن كلمة إلكترون ، هذا على الرغم من أن حديثنا ينطبق على الفوتون وعلى الذرة وعلى كل « جسيم » آخر على السواء . ولكن كلمة « إلكترون » نفسها ملوثة أيضاً بعض الشيء . فنحن ما زلنا ننظر إلى الإلكترون إلى الآن نظرتنا القديمة إلى جسيم .

بل كونوا على ثقة بأن هذا هو أحد الأسباب الرئيسية التي تجعل هذه المسائل غريبة متناقضة في نظرنا . ومع ذلك ، وعلى الرغم من كل هذه المفارقات ، علينا أن نفهم بوضوح أن ما نتحدث عنه هو الكون ، وليس عن نظريات خاوية منسوجة من خيوط العنكبوت . إننا نتحدث عن مواد يتكون منها جسمي وجسمكم والأشجار والحجارة والنجوم والقنابل الذرية والأمواج الراديو ــ كهربية والفيروسات والبطاطا والطماطم . كما أننا نتحدث عن الأسس المادية للمحبة والكراهية والوطنية والخيانة والوجد الصوفي الديني . بل إن خلف تصوراتنا الغريبة عن الكميتين p و q وعدم إمكان تعيينهما معاً ، يكمن عالم له كل صلاحية الواقع وقساوته ، وهو على علاقة وطيدة مع تلك التصورات .

فهذه كلها أمور نسلم بها ، ولكن كيف سيكون موقفنا لو أنه قيل لنا إن الإلكترون يمكن أن يكون في مكانين مختلفين في آن واحد ، أو أنه يتحرك في اتجاهين معاً ، أو حتى في أكثر من اتجاهين ؟ هذا ما سنطلع عليه بعد حين . لأننا مضطرون الآن للتآلف مع شيء تآلف معه الفيزيائيون أيضاً منذ زمن ليس ببعيد ، وهو قريب جداً من هذا الذي ذكرناه . على أن هذا الشيء ، رغم غرابته ، فقد يعرض بشكل مبسط ولكن متسق ، بل ربما أيضاً بشكل يقربه من حقائق مماثلة مألوفة بالأصل لدينا .

دعونا ، أولاً ، ننتهي من أصعب الحقائق . وبعدئذ سنرى كيف يمكن أن نستفيد منها على الوجه الأكمل لكي نصل إلى وضع مريح سنتردد بعده حتماً بالعودة إلى وجهة نظرنا القديمة ، التي رأينا عجزها عن تفسير بعض من أهم التجارب الأساسية .

يمكن للإلكترون أن يتحرك إلى الأعلى بسرعة ٥٠٠٠ متر في الثانية . وهذه حالة حركية لاغبار عليها ، يمكن أن نشير إليها بالرمز ψ . كما يمكن للإلكترون أن يتحرك إلى اليمين بسرعة ٨٠٠ متر في الثانية ، وهذه أيضاً حالة حركية يمكن أن نشير إليها بـ ψ مختلفة عن الأولى . والآن لنتذكر أن قواعد لغة الرموز عند ديراك ، كانت قد اسْتُخْلِصت من نظريتي هيزنبرغ وشرودنجر الناجحتين جداً . إن إحدى هذه القواعد ، وهي أهمها حتماً ، قاعدة التراكم التي لم نتحدث عنها بعد . فهذه القاعدة تقول

إنه يمكن أن يكون لدينا حالة حركية مكونة من خليط من الحالتين الحركيتين السابقتين : كذا من الأولى ، وكذا من الثانية . وهذه فكرة أصيلة وجديدة . إذ ليس المعني بها حركة متوسطة كلاسيكية بين الحركتين ، أي كما تركب عادة حركة من حركتين متزامنتين إحداهما نحو الشمال والأخرى نحو الشرق في النظرية الكلاسيكية ، فيكون الناتج حركة واحدة في اتجاه شمال شرق . بل إن الفكرة الجديدة لاتعني شيئاً يتفق مع حدسنا ، ولاشيئاً يريحنا كهذا (السابق) ، بل **هي تمثل الحركتين معاً** .

دعونا نعزي أنفسنا لبعض الوقت بالتفكير في أن ما ندرسه هو احتمالات . غير أن هذه الفكرة ، على الرغم من صوابها ، إلا أنها لن تصمد طويلاً دون تغيير . ومع ذلك لنحاول . لأن هذه الفكرة تشكل أيضاً عنصراً هاماً في الفيزياء الجديدة .

لنبدأ بإلكترون يتحرك نحو الأعلى بسرعة ٥٠٠٠ متر في الثانية (إن الحالة الحركية لهذا الإلكترون ، كنا أشرنا إليها بالرمز ψ)[1] فلكي نلاحظ وضعه ، نطبق على ψ هذه ، المؤثر q . وفي هذه الحالة ، تبرهن الرياضيات أن الحالة الجديدة $q\times\psi$ هي حالة مزيج مكون ، ليس فحسب من حركتين ، بل من عدد لانهاية له من الحركات الصرفة (أي العادية غير المركبة) التي تتم كلها معاً . فلكي نفهم المعنى الفيزيائي لذلك ، دعونا نستعمل مجهر هيزنبرغ (لكي نشاهد وضع الإلكترون) . إن هذه المشاهدة ، ستؤدي إلى تعديل غير محدد في سرعته . وكل ما يمكن أن نعرفه عن حركته الآن هو أنها ستكون على الأرجح هذه الحركة أو تلك أو أنها برجحان أقل هي حركة أخرى ، أو هذه الأخرى أيضاً ، وهكذا إلى أن نمر بلائحة الحركات اللانهائية المحتملة كلها . وهذه اللائحة على الرغم من أننا قادرون على تنظيمها بحيث تضم جميع الحركات الممكنة مع احتمالاتها الخاصة بها ، إلا أننا لانستطيع أن نحدد الحركة المضبوطة دون أن نجري عملية مشاهدة أخرى إضافية سيتضح أنها غير مجدية ، لأنها تغير من حالة الحركة فتؤدي فوراً إلى إلغاء الإعلام الذي أفادتنا به هي نفسها . وبهذا المعنى إذاً يندفع الإلكترون

---

(١) راجع بداية الفصل ١٣ نفسه .

بعدة حركات معاً ، وبهذا المعنى يندفع فعلاً بحركةمعينة ، ولكننا لانعرفها ، ولايمكننا أن نعرف أي واحدة هي من هذه الحركات . ولنتذكر أن هذه الحقيقة يسيرة بالنسبة لما سيأتي من تعقيدات . ولكنها على كل حال فرصة طيبة تمهد لغوصنا في مياه أعمق . فلنسترح هنا قليلاً لكي نبحث حولنا عن أمثلة مألوفة في حياتنا اليومية ، بحيث تكون مماثلة لهذه الأوضاع .

يوجد وضع شبيه بهذا في الوراثة . لذلك سنأخذ مثالاً بسيطاً شائعاً : إن تزاوج دجاجة سوداء وديك أبيض يعطي صوصاً لايعرف لونه قبل أن تفقس البيضة . ولكننا نستطيع أن نستبق الأمور ، فنقول : إن الصوص سيمثل حالة لونية واحدة هي خليط من الألوان : ٢٥٪ أسود ، و٢٥٪ أبيض ، و ٥٠٪ من المزيج أزرق ـــ رمادي ، وهو الخاص بالنوع المعروف باسم أندلسي .

وهذا لايعني أن الصوص سيكون مزيناً بكل هذه الألوان معاً . بل إن له لوناً واحداً منها . ولكن عدم توافر المعلومات الكاملة ، يجعلنا نكتفي بالاحتمالات . وإذا ولد مئة صوص من هذا التزاوج ، يمكننا أن نتوقع عندئذ ، وبشيء من الثقة المدعومة بتجربتنا السابقة أن حوالي خمسة وعشرين منها ستكون سوداء ، وخمسة وعشرين بيضاء ، وخمسين رمادية أندلسية . أماالصوص الواحد فله لون واحد من هذه الألوان ، وهذا اللون نستطيع أن نحدده عند خروج الصوص من البيضة . وعندئذ (أي بعد خروج الصوص) ، نكون قد حصلنا على معلومات إضافية ، وهذا ما يقابله ملاحظة جديدة ، كما أن هذه الملاحظة تبدل من حالة معلوماتنا ، بأن تنقلنا من حالة لون مركب من جميع الألوان إلى حالة لون واحد منها .

ويمكننا أن نوضح ، بمثال محسوس ، الفكرة من حالة خليط مركب يمثل نقص المعلومات . وهو مطاردة غواصة بحرية دون الاستعانة برادار أو بغيره من أنظمة الكشف . فإذا لاحظ طيار إحدى غواصات العدو لحظة غطسها في الماء ، فإنه سيعرف موضعها ، ولكنه لن يعرف اتجاه حركتها . فالغواصة إذاً بالنسبة له هي حالة خليط مركب من جميع الحركات التي يمكن أن تقوم بها الغواصة من نقطة الغوص .

ويمكن أن نمضي في هذا التشبيه إلى أبعد من ذلك : فالغواصة عندما غاصت في الماء ، تلاشت في الأمواج بكلا معنيي هذا التعبير[1] (لقد تحولت إذاً إلى حزمة أمواج شرودنجر) .

وعندما جمع شرودنجر أمواجه الإلكترونية في حزمة أمواج ، وجد الوسائل التي مكّنته من تحديد موضع للإلكترون . إلا أن حزمة الأمواج لم تبقَ متجمعة ، بل تبددت وتناثرت . وإذا تساءلنا لماذا ؟ فذلك لأن شرودنجر حين أعطى إلكترونه موضعاً ، أضاع ، بحسب مبدأ هيزنبرغ ، جميع المعلومات المتعلقة بحركته ، وهذا ما يتمشى مع رأي بورن القائل إن أمواج شرودنجر هي أمواج احتمال . وكان له ما يبرر ذلك ، وإلا فأين يكون الإلكترون بعد لحظات من توضعه إذا كنا لانعرف حركته واتجاهه ؟ فهو ، بشكل ما ، ليس في أي مكان ، أو يمكن أن يكون تقريباً في أي مكان ، وهو على الأرجح على مقربة من وضعه الأول . فبعد هذا التفسير الأخير ، لم يعد هذا الوضع إذاً ، أكثر من احتمال ينتشر بسرعة . ولكن حزمة أمواج الاحتمال تتبدد ، فمع مضي الوقت سيزداد جهلنا بموضع الإلكترون وسيزداد أكثر تبدد حزمة الأمواج .

ولو عدنا إلى مثال الغواصة لرأينا الوضع نفسه . ففي اللحظة التي رآها فيها الطيار كانت حزمة أمواجها في أحسن حالات تماسكها . فإذا وصلت الطيارة بسرعة إلى نقطة الغوص تصبح قنابل الأعماق أكثر حظاً في إصابة هدفها . أما إذا تأخرت الطيارة ، فإن فرصها في إصابة الغواصة تتناقص شيئاً فشيئاً ، لأن « وضع » الغواصة سيتوسع مع مرور الدقائق ، ويصبح ممتداً على منطقة احتمال دائرية واسعة مثلما أن التموجات التي تخط سطح المحيط تتوسع بدءاً من نقطة الغوص . فحزمة أمواج الغواصة التي كانت في البدء في ذروة تماسكها وتجمعها ، ستتفكك بسرعة كلما مضى عليها الزمن الثمين .

والآن ، لنترك حزمة الأمواج لكي نعود إليها فيما بعد ، فما زال فيها أشياء تهمنا . ولنتحدث الآن عن جوانب وتشبيهات أخرى تثير اهتمامنا مثل لعبة

---

(١) أي غاصت في **الأمواج** ، وطاش وضعها في **أمواج** احتمال بالنسبة للطيار (المترجم) .

« النسر والكتابة » . فحين تُقذف قطعة النقود (المعدنية) في الجو ، فإنها لاتُظهر لاالنسر ولاالكتابة طالما أنها لم تلامس الأرض . ذلك لأنها تتقلب بسرعة في الجو . ولكن دعونا نفترض الآن أننا نجهل كل شيء عن حالها في الفترة الواقعة بين رَمْيها وبين استقرارها على الأرض . ولنفترض أن العالم قد جعل على هذه الصورة ، أي أنه يستحيل أن نلاحظ فيه أي حركة تتوسط وضعي استقرار ، وأن هناك مبدأ شرساً مشاكساً يقف دائماً حائلاً دون هذه الملاحظة . فما النظرية التي يمكن أن نبنيها على هذا الواقع ، واقع عملة النقد المقذوفة في الجو ؟

هناك شيء لم نكن أبداً نتوقع أهميته ، وهو أن قطعة النقود لايمكن أن تظهر إلا نسراً أو كتابة ، ولاشيء غير ذلكَ ، فلا يمكن أن نلاحظ إذاً سوى نوعين ممكنين من النتائج ، كما نكتشف بسرعة أن التنبؤ بالنتيجة النهائية مستحيل . ولو قررنا أن نعترف بجهلنا في هذا المضمار ، وعبرنا عنه بلغة الفيزياء الحديثة ، لقلنا إن حالة القطعة خليط من نسر وكتابة ، كما أن سلسلة مشاهدات كثيرة تقودنا إلى نتيجة مفادها بأن عدد مرات سقوط القطعة على وضع النسر مثل عدد مرات سقوطها على وضع الكتابة، لذلك نقول : نظراً إلى هذه الحالة المختلطة للقطعة فإن لها احتمال خمسين في المئة لتكون على وضع الكتابة وخمسين بالمئة لتكون على وضع النسر . ولدى وصول القطعة واستقرارها على الطاولة ، سنعرف طبعاً ما هو وضعها بشكل أكيد : فإما الكتابة وإما النسر . فحالة القطعة (بالنسبة لنا) تنتقل من وضع مختلط إلى وضع نقي صرف . وما هذا الانتقال من حالة إلى أخرى إلا نتيجة لفعل الملاحظة ، الأمر الذي يمكن أن يعبر عنه بلغة الرياضيات بالرموز .

ولكن دعونا نفترض أن عقلنا لايرضى إلا بالرؤية والمشاهدة . في هذه الحالة سنحاول أن نتصور سيرورة العمليات على شكل خيالي تصويري، وسنجرب أن نتخيل آلية أو سيرورة متوسطة (بين وضعي الاستقرار) . عندئذ سنتمكن بشيء من الذكاء أن نتخيل تقلب القطعة في الفضاء . وهي صورة صحيحة لن تتعارض مطلقاً مع أي أثر معروف من آثار التجربة التي يخولنا مبدأ المشاكسة الشرس ملاحظتها . والشيء الوحيد المزعج هو أننا لانملك وسيلة لملاحظة تقلب القطعة الحقيقي نفسه . ولكننا

نستطيع أن نقوي ثقتنا بقليل من نظرية الكم ، لأننا سنلاحظ أن القطعة ، لكي تتقلب ، لابد لها من الطاقة ، والطاقة مرتبطة بالتواتر ، وهذا التواتر يمكن اعتباره معدل تقلب القطعة (أو وتيرة تقلبها) . فكلما كانت كمية الطاقة كبيرة ، يكون معدل التقلب أسرع .

وهنا ، بهذه الصورة الأخيرة ، قد ينير بريق الإلهام بصيرتنا فجأة . ترى لماذا لم نكتشف أبداً اختباراً تجريبياً لعملية التقلب ؟ الأمر بسيط ، لأن وسيلتنا الوحيدة لملاحظة القطعة النقدية هي تركها تستقر على الطاولة . ونتيجة لذلك ، ستحدث للقطعة النقدية ، هزة غير محددة لتأثير هذه الملاحظة . إن القطعة كانت قطعاً تتحرك حركة حرة ، ولكننا نحن الذين نفرض عليها (بإسقاطها على الطاولة) ألا يكون لها سوى وضعين محتملين . لأن ترك القطعة تسقط على الطاولة ، هو الذي يلزمها بأن تكون في وضع نسر أو كتابة ، ولاشيء غير ذلك . ولو أننا تركنا القطعة تستمر في سقوطها لظلت تتقلب بلا نهاية . ولكن مبدأ المشاكسة الشرسة سيمنعنا عندئذ من رؤيتها نهائياً .

على أننا سنفهم بعد حين أن كل هذا الذي قيل عن قطعة النقود لم يكن سوى صورة ذهنية غايتها تأمين راحتنا الفكرية . لقد أهمل هذا التصور الشيء الوحيد الذي يجب أن نحتفظ به بعيداً عن كل الأشياء الأخرى ، وهو مبدأ المشاكسة ذاته . فنحن لم نشاهد تقلب الإلكترون . فالتقلب بالتالي بحسب معرفتنا لم يحدث فعلاً . ولو أنه كان قد حدث فعلاً لمنعنا مبدأ المشاكسة الشرس في الحقيقة من رؤيته . وإذا كان مبدأ المشاكسة هذا يتعدى كونه مجرد مصادفة (والحق أن في عناده الخبيث ما يشير بلا أدنى ريب إلى أن هناك شيئاً أقوى وأكثر تأصلاً وجوهرية مما في الظاهر) ، فعندئذ لابد من أن نحذر هذا التقلب الذي يصر على إخفاء نفسه عنا ، ذلك لأن من الجائز ألا يكون هناك حركة على الإطلاق . وعلى الرغم من أننا استطعنا أن نشرح لماذا تحجب الملاحظة دائماً عملية التقلب ، إلا أن هذا لايعني أن هذا التقلب موجود فعلاً . إننا حين نفكر على هذا النحو ، فكأننا نؤكد جواز وجود رسم جميل بالأحمر والأخضر على القطعة النقدية ، ولكننا مصابون لسوء الحظ بعمى الألوان . وما لم نكتشف طريقة تجريبية تزيح عنا مبدأ المشاكسة ، فإن التقلب سيظل أبداً بعيداً عن أن

يكون موضوعاً لدراسة جدية بالنسبة للفكر العلمي . فيجب أن نتعقل ونتروى ، وإلا ضللنا . إننا نملك نظرية ملائمة تماماً ، وتحقق جميع الوقائع المشاهدة ، فلماذا نريد أن نذهب إلى أبعد من ذلك ؟ دعونا نرجع إلى وجهة نظرنا المتحفظة ، ولنترك كل محاولة لوصف التقلب أو أي آلية متوسطة ، دعونا نرجع إلى القطعة النقدية التي ليس لها سوى حالتي وضع متزامنتين ، (نصف كتابة ونصف نسر) دعونا نرجع إلى حقيقة أن حالة القطعة تتغير نتيجة الملاحظة .

طبعاً ، نحن لن نتخلى عن صورة القطعة النقدية المتقلبة في الجو إلا مكرهين آسفين . فهذه الصورة كانت مسلية فعلاً . ولربما كنا نحتفظ إلى الآن بأمل دفين في أن نراها تعود يوماً إلى الظهور . ثم من يدري ، فلعل تقدماً علمياً كبيراً سيتيح لنا يوماً ما رؤية هذا التقلب بعيوننا . ولكن إلى أن يأتي ذلك اليوم الافتراضي ، فإن هذا الأمر سيظل خيالاً ، بل ربما خيالاً خطراً ، لأن المضحك في القصة هو أننا لانعلم أحقاً كانت القطعة تتقلب أم لا . وإذا كانت هذه المشاكسة تمنعنا من ملاحظة هذا التقلب ، فلماذا لاتمنع هذا التقلب نفسه ؟ على أن لغة الرموز التي نستعملها تطبق مع ذلك ، سواء أهناك تقلب أم لا ، لأنها لاتستند إلا إلى نتائج معلومة . ولكن تصورنا لقطعة النقود المتقلبة لايعدو كونه افتراضاً[1] .

أنود أن نظل على حالنا متشبثين بهذا التقلب ؟ وهل نظن أن ليس ثمة تفسير ممكن آخر له معنى ؟ ألدينا شعور بأننا ننخرط في تحليلات فلسفية مرهفة حين ندعي أن التقلب قد لايكون أكثر من وهم ؟ إذا كان الأمر كذلك ، فدعونا نفكر بمثال مبتذل ألفه الناس جميعاً . فعندما نتلقى إشارة « مشغول » في هاتف موضوع في « كشك » مأجور ، ثم نتلقى قطعة النقود ، هل نعتقد عندئذ حقاً أن القطعة كانت تتقلب في الجهاز طيلة الوقت ؟ ليس صعباً أبداً أن نبتكر نظرية ذكية تربط بين هذا التقلب وبين نوع الرنين الذي نسمعه . ولابد أن هذه النظرية ستفسر بشكل بديع كيف يتوقف هذا الرنين عند عودة القطعة إلينا . ولكن النظرية ستكون خطأ حتماً ، لأن القطعة

(١) وهذا ما كنا نود لو أننا نستطيع تصوره عن مسار الإلكترون ، فالصورة هناك أكثر تعقيداً (المترجم) .

التي نأخذها من الآلة ، ليست ــ بحسب علمنا ــ هي قطعتنا نفسها بالضرورة ، ويمكننا أن نتصور بسهولة وجود مستودع للقطع داخل الجهاز . وهذا المستودع هو الذي يخرج إحدى القطع عندما نعيد السماعة . لذلك يجب أن نتجنب الاستنتاج السريع . فقد تكون استنتاجاتنا كلها خاطئة رغم مظهرها الواضح . ثم إن التقلب ، بعد كل شيء ، لم يكن سوى افتراض لاغير .

وهكذا يجب أن ننظر إلى مبدأ هيزنبرغ في اللاحتمية ، وفي ضوء هذه النظرة . فهو على الرغم من أنه يضفي على الجسيم مظهر جسيم عادي قديم يوحي بأن الملوم عن سلوكه هو عيب في مهارة المجرب ، إلا أنه لايصادق على هذا التصور القديم للجسيم . بل على العكس ، إنه يقول : إذا كان نقص المهارة أمراً غير محدد ولامناص منه ، فهذا خير دليل على قوة روح المشاكسة ووجودها في كل مجال ، وأنها هي التي تحطم جهودنا لمشاهدة مزايا الجسيم (هذا إذا كان حقاً جسيماً على النمط القديم) ، وهي التي تجعل مزاعمه متخلفة وموضع شبهة قوية . وهذه حقيقة أساسية ، فإن نحن لم نأخذها بعين الاعتبار ، ونكف عن تصور الجسيم بشكله القديم ، فإننا قد نتورط في بلبلة فكرية لاأول لها ولاآخر .

والآن ، ها قد قد حانت اللحظة كي نترك موضعنا المريح ، فلنتجه نحو هدفنا الأخير برفق . فعندما قلنا عن إلكترون ينتقل في آن واحد في اتجاه الشمال وفي اتجاه الشرق إنه في حالة مركبة ، كنا نود لو أن هذا القول كان مجرد اعتراف بجهلنا وبأنه يعني فحسب أن الإلكترون يتحرك في الحقيقة مباشرة نحو الشمال أو مباشرة نحو الشرق ، وأن ما يمكن تأكيده هو أن هناك احتمالاً قدره كذا لكي يتجه شمالاً ، واحتمالاً قدره كذا لكي يتجه شرقاً ، وأن معرفة هذين الاحتمالين تتطلب إجراء التجربة نفسها مرات عديدة لكي نقدر كلاً منها . ولكن مهما بلغت عنايتنا بعملنا فإن تجاربنا لن تعطي إجابة لالبس فيها . لأن ما نتبينه منها هو هذين الاحتمالين فحسب . وكنا نود أن نقول بدلاً من ذلك ، أنه لايمكن لإلكترون بمفرده أن يقوم إلا بإحدى الحركتين الممكنتين ، ولكن لاتوجد وسيلة لمعرفة أيهما إلا بإجراء تجربة ثانية ، الأمر الذي سيؤدي إلى تعديل في الحالة .

ولكن للأسف ، إن جميع هذه المحاولات لن تسوي الوضع بل سيتوجب علينا تحطيم كل شيء . فضغط الحقائق التجريبية سيجبرنا على ترك هذه الأوهام المختلفة المريحة ، لأن النزاع موجة ــ جسيم مازال محتدماً في بعض الميادين .

لذلك يحسن بنا أن نستعرض مرة أخرى أسلحة الموجة والجسيم الاساسية . هل نود أن نثبت أن الإلكترون جسيم ؟ ليس هناك ما هو أسهل : لنقذفه على حاجز يتوهج وسنلاحظ لمعانه الميكروي . أو لننظر إلى مساره الدقيق الذي يرسمه في غرفة ويلسون . أو لندعه يسقط على لوحة فوتوغرافية ، وسنلاحظ عندئذ النقطة المضيئة بعد التظهير . فصدقوا إذاً أنه جسيم .

هل نود أن نثبت أن الإلكترون موجة ؟ كل شيء جاهز . دعونا نضع حاجزاً فيه ثقبان صغيران متقاربان جداً . ولنترك تياراً من الإلكترونات يتدفق من منبع واحد . والآن دعونا نشير بفخر ممزوج بشيء من الغرور إلى أن حلقات التداخل قد ظهرت على اللوحة الفوتوغرافية[1] الموضوعة خلف الحاجز . إذاً تأكدوا أن الإلكترون موجة .

ولكي نثير اهتماماً أكثر عند القارئ ، دعونا نمزج البرهانين معاً لنثبت أن الإلكترون موجة وجسيم في آن واحد[2] ، عندئذ تصبح هذه العملية مادة جيدة للتأمل (إذ تبرز المفارقة بجلاء) . فمثلاً يكفينا أن نرسل الإلكترونات الصادرة من منبع واحد عبر ثقبين مفتوحين في حاجز لكي تسقط بعده على حاجز آخر يتوهج . إن الومضات التي سنراها ، ستثبت أنها جسيمات ، بينما تثبت حلقات التداخل أنها موجات . وبذلك نحصل على منظر رائع خلاب .

على أن هناك أمراً بدأ يثير شكوكنا . فالأمواج ، كما يبدو ، تنشأ عن تجمع إلكترونات وليس عن إلكترونات معزولة . ولكن دعونا نتروى بدلاً من أن تربكنا هذه التجمعات ، ولنتفحص بانتباه سلوك إلكترون وحيد . فإذا أحدث في النهاية

---

(١) هذا إذا ظهرت ، لأن إظهارها صعب جداً ، ولذلك قال ، نشير إليها بفخر مشوب بالغرور (المترجم) .

(٢) إذ تنفضخ عندئذ مفارقة الجمع بين ظاهرتين متباينتين (المترجم) .

وميضـاً (وهذا ما يحدث طبعـاً) ، يكون جسيماً حتماً . فكيف يمكن أن يكون موجة أيضاً ؟ ألأنه يشكل شبكة تداخل ؟ ولكن أين شبكة التداخل هذه طالما أنه مجرد وميض معزول ، وهذا لايشكل شبكة تداخل ؟ فالحقيقة أن هذه الشبكة ناشئة عن ومضـات عديدة ، وهذا يتطلب أعداداً كبيرة فعلاً ، فالومضات الفردية تتركز في بعض النقاط دون أخرى ، وهذا كل شيء . بمعنى أنها كالمدفعية . فعندما تقوم المدفعية برمي جماعي ، فإن الانفجارات لاتبدو كأنها ناشئة عن قنبلة واحدة ، وإنما عن مجموعة من الانفجارات . وليس أسهل من أن نقوم برمي جماعي يعطي شعوراً بوجود شبكة تداخل . ولكن هذا ليس سبباً لأن نفهم بأن القنبلة أصبحت موجة . وهناك مثال آخر هو حقل القمح . إذ لابد أنكم لاحظتم كيف تنتشر الأمواج على حقل القمح حينما تتمايل السنابل مع كل هبة نسيم ، مع أن القمح ليس موجة . فالمشكلة محلولة إذاً ، لقد حلت مسـألة الموجة — جسـيم ، وما الإلكـترون سوى جسيم . وكذلك الفوتون . ولايمكن أن تتجمع هذه الجسيات على شكل موجة إلا حين تشاهد بأعداد كبيرة .

ولكن هذا التفسـير أيضـاً لايصـلح . وإذا ظللنـا نتهرب من النتيجـة المحتومـة فإن الخطأ سيستمر ، وسنظـل في الطريق الخطـأ . بل إننـا نوشك على اتخاذ منحى الضـلال ، فنستهين ، مخاطرين ، بصعوبة قضيتنا ومدى رهافتها وهذا قد يكون خطيئة مميتة . إن قضيتنا ليست من النمط الساذج إلى هذا الحد ، وإلا لكانت قد حلت منذ العهود الأولى . حقاً إن ظهور شبكة التداخلات لايتم فعلاً إلا في حال وجود كثرة من الإلكترونات . ولكن لابد أن وراء هذه الشبكة سبباً لظهورها في هذه الحالة ، وهذا السبب لابد أنه كامن بشكل ما في كل إلكترون بمفرده ، إن المدفعية يمكن أن تحدث بقنابلها تجمعات الحفر نفسها (التي ذكرناها منذ قليل) إن هي أطلقت تباعاً بدلاً من أن ترمى كلها دفعة واحدة . لأن الرمي يوجهه إنسان لكي يحدث الأثر نفسه . أما إذا أطلقنا إلكتروناتنا الواحد تلو الآخر بفترات متباعدة فيما بينها ، ووضعنا إشـارات عند مواضع ومضاتها الفردية ، فسنجد أيضاً أنها تتفق مع شبكة التداخل الخاصة بها . ولكن هذه الشبكة يصعب فهمها ولايمكن مقارنتها برمي المدفعية المتجمع ، لأن التنظيم في هذه الحالة لايأتي من أي جهة خارجية واضحة أو وفق مخطط معين مسبق كما في المدفعية . فعلى الرغم

من أن كل ومضة فردية تحدث مصادفة كما يبدو ، إلا أن هذه المصادفة تخفي وراءها ذوقاً رفيعاً في فن البناء ، لأن الومضات تتجمع شيئاً فشيئاً ، وتنتهي إلى تشكيل شبكة التداخل المميزة للأمواج .

ترى كيف يتأتى ذلك للإلكترون ؟ وفي حالة وجود ثقبين ، بأي واحد منهما يمر إلكترون لا على التعيين ؟ إن شبكة التداخل هنا تنتج عن فتحتين ، وهذه حالة تختلف كلياً عن شبكة تداخل تنتج عن ثقب واحد . إذاً ، شئنا أم أبينا ، لامفر لنا أبداً من تلك النتيجة القاسية ، وهي أنه إذا كان كل إلكترون معزول يتضمن بشكل كامن — إن صح القول — شبكة التداخلات الناتجة عن فتحتين ، **فما ذلك إلا لأن هذا الإلكترون المعزول قد مر بهاتين الفتحتين معاً وأنه بعد خروجه قد تداخل مع نفسه**[(١)] .

هل تجدون في هذا مبالغة يصعب « ابتلاعها » وهل تجدونه لايصدق ، وأنه يتناقض كلياً مع أبسط قواعد الحس السليم ؟ ربما ، ولكن هذه النتيجة تستند إلى أقوى الاختبارات العلمية المقنعة .

عفواً ، انتظروا قليلاً ! إننا سنحتال على الإلكترون لكي نجبره على الاعتراف بتزييفه . لذلك دعونا نضع جهاز مؤشر على كل ثقب من ثقبي الحاجز . فإذا أطلقنا من منبعنا إلكتروناً معزولاً لكي يجتاز الحاجز ، فسنستطيع حتماً أن نتحرى مروره بهذا الثقب أو ذاك ، وليس بالإثنين معاً ، لأن الإلكترون لايتجزأ كما نعلم . وبذلك سنبرهن نهائياً أنه لم يجتز سوى إحدى الفتحتين ، وسنشير بأيهما قد مر . إذ إننا لسنا ممن يخدعون بنظريات مستحيلة . وهل تظنون أننا أطفال لازالوا يعتقدون بحكايا الجن ؟ كفانا حماقات من هذا النوع .

نعم نستطيع حقاً أن نعرف بأي ثقب مر الإلكترون : وسنبرهن أيضاً أنه اجتاز ثقباً واحداً وليس الإثنين معاً . ولكن هذه التجربة (التي ستثبت

---

(١) الحقيقة أن كل الحجج السابقة لاتكفي لإثبات أن الإلكترون موجة وجسيم في آن واحد . فقد تكون قذائف الإلكترونات تنطلق باحتمالات ذات نظام معين يجعلها تحدث هذا الأثر . ولكن يظن حالياً أن ظواهر التموج قد ظهرت في المخبر حتى في حال فوتون مفرد معزول (ولمزيد من الاطلاع ، يمكن مراجعة مجلة عالم الذرة ، عدد أيلول/سبتمبر ١٩٨٧) المترجم .

ذلك) مختلفة كلياً عن السابقة ، ولن تتعارض مع ما قلناه سابقاً ، لأننا لن نقوم فيها بإمرار إلكترونات عبر حاجز مثقوب بفتحتين صغيرتين بسيطتين جداً . إن روح المشاكسة تتحدانا دائماً أينما كان ، فدعونا نرقبها وهي تقوم بعملها العجيب : لنفرض أننا اكتشفنا أن الإلكترون قد مر بالثقب السفلي . بما أن الأداة التي تشير إلى دخول الإلكترون ، كانت قد تأثرت بدخوله ، فلابد أن الإلكترون نفسه قد تأثر أيضاً بالأداة ، ولكن دون أن نعرف بالتحديد إلى أي مدى . فكيف يمكن إذاً أن نأمل بالحصول على شبكة تداخل من كثرة إلكترونات ، إذا كان كل منها سيتأثر تأثراً غير محدد ويختلف عن تأثر الإلكترونات الأخرى ؟ وعلى هذا ، إذا كنا لانستطيع أن نكون شبكة تداخل ناتجة عن ثقبين ، فأين هو إذاً المبرر الذي يؤكد أن كل إلكترون قد مر في آن واحد بالثقبين ؟ في الجواب نقول : إن الوضع هنا أصبح مختلفاً كلياً عما كان منذ قليل ، لأننا حين أغلقنا مهرباً في فخنا ، فتحنا فيه مهرباً آخر . فالجهاز نفسه الذي يبرهن أنه ما من إلكترون معزول قد مر في آن واحد بالثقبين معاً ، هذا الجهاز ، أفسد شبكة التداخل التي كانت تنتج عن الثقبين ، وبذلك أتاح للإلكترون أن يفلت من الفخ الذي نصبناه له .

دعونا ننظر إلى هذه المسألة من زاوية أخرى . وذلك بأن نعيد الثقبين كما كانا دون أجهزة في هذه الحالة ، لابد لكل الكترون يجتاز الحاجز من أن يكون في حالة حركية مركبة فيعبر الثقبين في آن واحد ، ولذلك تتداخل الحركتان إحداهما مع الأخرى لتشكلا شبكة التداخل . ولكن ماذا يحدث حين نضع أجهزة التأشير ؟ عندئذ كل إلكترون يجتاز الحاجز يكون قد ثبت على حالة حركية صرفة (غير مركبة) ، ويمر بهذه الفتحة أو تلك ولايمكن عندئذ أن نتوقع الحصول على شبكة تداخل ناتجة عن الثقبين . لأن مراقبتنا الدخيلة أدت إلى تعديل الحالة الحركية بحيث لم تعد هي تلك التي ترتبط بالثقبين معاً .

هل كان كل ذلك صعباً ومثبطاً للهمم ؟ وهل أن فكرة إلكترون يحتل عدة مواضع دفعة واحدة ويستطيع القيام بعدد من الحركات في آن واحد ، هي فكرة تأباها إحساساتنا وتجعلنا نتردد في قبولها ؟ هذا صحيح ، لقد أثقلنا كاهل الجسيم بالفعل لكثرة ما كنا « من دعاته » . ولكن لاتظنوا أن العلماء يتقبلون هذه الآراء الجديدة

بصيحات الفرح ، إنهم يحاربونها ويقاومونها على قدر طاقتهم ، ويبدعون سلسلة من الفخاخ والفرضيات لكي يحاولوا الخلاص منها ، ولكن دون جدوى . غير أن هذه المفارقات الصارخة ، المفضوحة ، كانت موجودة أصلاً منذ عام ١٩٠٥ في حالة الضوء ، وحتى قبل ذلك بمدة .. ولم يكن لدى أي شخص تلك الجرأة أو الذكاء لكي يحل عقدتها قبل ظهور ميكانيك الكم الجديد .. وإذا كانت هذه الأفكار الجديدة صعبة القبول ، فما ذلك إلا لأننا نصر بصورة غريزية على محاولة وصفها بعبارات الجسيمات القديمة على الرغم من مبدأ هيزنبرغ في اللاحتمية . كما نأبى أيضاً اعتبار الإلكترون شيئاً ليس له وضع إذا كانت له حالة حركية ، وحين يكون له وضع ، يمكن ألا تكون له حالة حركية أو سكونية . لذلك نظل مصرين على محاولتنا في أن نعزو هذه المزايا الأساسية في الإلكترون أو في الفوتون إلى قلة مهارة المجرب البريء .

وعلى الرغم من كل هذه الدلائل على تشوش رؤيتنا (السابقة) ، فإننا لم نتخلَ عن زاويتنا المريحة . بل لقد أصبحت بدلاً من ذلك نقطة انطلاق نحو خطوات تقدم جديد .لأننا مازلنا نستطيع أن ننظر إلى حالة حركية مركبة على أنها اعتراف بجلهنا في شؤون نتائج المشاهدة المحددة ، واعتبار هذه النتيجة مجرد تعداد لاحتمالات مختلفة . كما أننا مأزلنا نعتبر شبكات التداخل التي تجسد هذه الاحتمالات ، نتيجة لتأثير الأعداد الكبيرة (بمعنى أنها لاتحدث في حالة جسيم وحيد ، وإنما تنجم عن توزع كثير من الجسيمات على شكل شبكة تداخل) . وكل ما تبدل هو التصور الذهني فقط . لقد فهمنا أخيراً استحالة تمثيل العمليات الذرية بطريقة أخرى غير طريقة الصور المضخمة البشعة . لقد رأينا الجوانب الغريبة التي يجب أن تتخذها خيالاتنا العقلية ، لكي نسترق النظر إلى ما يكمن خلف مبدأ اللاحتمية .

ولكن الذي فهم ذلك كله بأحسن ما يكون من الدقة والعمق هو بوهر . فهو الذي وضع أخيراً حداً للنزاع موجة ـــ جسيم ، وهو أول من رسم بوضوح وعمق ملامح العصر الجديد المعقد المنفتح على العلم . لقد فهم أن الموجة والجسيم ليسا سوى وجهين لشيء واحد ، وأنهما ليسا عدوين (كما كان يظن في بادئ الأمر) . وأن معركتهما كلها لم تكن سوى ظاهر زائل ، وحربهما الطويلة الأمد لم تكن أكثر من خدعة تشهد بشهادة صارخة على أثر الدعاية الكلاسيكية . فإذا استولت الموجة على جزء

من الأرض ، فلن ينـازعها فيها الجسيم منازعة حقيقية ، بل سيعمد إلى احتلال منطقة أخرى مقابلها . وإذا فسرت الموجة ظواهر التداخل فلن يحاول الجسيم القيام بأي هجوم معاكس جدي . بل يعزي نفسه بتأكيد حقه بالمفعول الضوئي الكهربائي الذي لاتنازعه عليه الموجة . لقد كانت حربهما أكثر الحروب الكاذبة أدباً وتهذيباً . ولكنها بدأت بضربات بوق ضخمة حتى ظُنَّ أن ثمة معركة محمومة تدور رحاها بينهما . فمثلاً ما الذي حدث عندما ركزنا أجهزة (المراقبة) عند مدخل الفتحتين في الحاجز ؟ هل ألزمت هذه الأجهزة الموجة والجسيم بأن يحسما الصراع الحقيقي الدائر بينهما ؟ أبداً إطلاقاً ، لقد قدم الجسيم للموجة بكل تهذيب وسيلة للإفلات من الفخ دون ضجيج (وظل هو وحده في الميدان) .

وعندما ساورت العلماء أخيراً الظنون حول طبيعة هذه المهزلة الحقيقية ، راحوا يتخيلون حيلاً أكثر دهاء ليجبروا الموجة والجسيم على التنازع فيما بينهما . غير أن بوهر وآخرين أيضاً ، تمكنوا من البرهان بالتفصيل على أن مبدأ المشاكسة السلمي ، أو مبدأ اللاحتمية لهيزنبرغ ، كان دائماً في مكانه يرقب بحذر هذه المحاولات ، ومستعداً لمنع النزاع (على الأرض المنتقاة) حتى في بدايته . فحتى لو حاولنا اعتبار الموجة والجسيم كيانين متمايزين ، لما جاز لنا أن نعتبرهما عدوين مستميتين ، بل الأحرى أنهما كأولئك المقاتلين المتهنين الذين يقومون باستعراض ألاعيبهم فوق المنصة . والحقيقة أنهما ليسا متمايزين فعلاً ، إنهماصورتان مجزوءتان ، ومتناوبتان ، لكيان واحد .

إن هذه النظرة التكاملية للموجة والجسيم على أنهما وجهان لكيان واحد ، هو الميزة الرئيسية في الفيزياء الجديدة ، إنها نظرة لامناص منها ، وجانب أساسي في ميكانيك الكم . فقواعد لغة الرموز تؤدي إليها ، كما أن مبدأ هيزنبرغ في اللاحتمية يعطينا تبريراً مصوراً لها . ولقد زعمنا من قبل أن حزم الأمواج عند شرودنجر لم تكن سوى مثيلات سطحية لحالات ديراك المختلطة . لكن بوهر برهن أنها أكثر من مجرد مثيلات ومحاكيات ، بل هي بالفعل نسخة مضبوطة عنها ، كل ما في الأمر أن اللغة المستعملة للتعبير عنها هي لغة الأمواج بدلاً من الجسيمات . ويمكن أن تستخرج منها بكل سهولة علاقة الارتياب بين الاندفاع وبين الوضع أو بين الطاقة وبين الزمن . وقد أشرنا قبل

قليل ضمناً إلى هذه النقطة ، وذلك عندما درسنا لاحتمية تحديد الاندفاع والوضع معاً من وجهة النظر الجسيمية ، ثم استدلينا على لاحتمية الطاقة والزمن من وجهة النظر التموجية . فالحال هنا أيضاً على ما هي عليه دائماً في نظرية الكم ، فكما أن نظريتي هيزنبرغ وشرودنجر تذوبان في نظرية واحدة هي نظرية ديراك ، كذلك تذوب الموجة والجسيم في كل متماسك أو بالأحرى في كيان موحد اقترح له إدنجتون التسمية أونديكول Ondicule ، وهي منحوتة من كلمة Onde (موجة) وكلمة Particule جسيم . وكان أحد الشعراء قد نظم لفتاته شعراً (ترجمه أحد الاخوة شعراً باللغة العربية ، هذا إن انطبق عليه هذا الوصف) :

كانت فتاة ذات مرة تزدان جبهتها بغرَّة
في الوسط بين الحاجبين تخالها بالعين درَّة
إن رقَّ معشرها ولان ومدّ للخلان جسرا
هتف الفؤاد لحبها ، بشراً وصار لها مقرّا
أما إذا عصف المجون بلبها واشتد شرّا
حزن الجميع لحالها أسفاً وما عرفوا المسرَّة

وما حال الإلكترون إلا كحال هذه الفتاة ذات الغرة ، فهو تارة يظهر هذا الجانب من طبيعته وتارة ذاك الآخر . ولكن ذلك لايمنعه من أن يكون إلكتروناً نظامياً بكامل صحته ، بل إن الإلكترون قد لايكون أهلاً لهذا الاسم إن لم يظهر بكامل شخصيته التي تشبه الموجة تارة والجسيم أخرى . فإذا أضاء نور أحمر صفحات هذا الكتاب ، عندئذ تتلون الورقة بالأحمر الزاهي ، ولو استبدلنا بهذا اللون لوناً أزرق ، تبدل اللون الأحمر الزاهي إلى أزرق . وهذا لايعني أي تناقض . فاللون الأحمر الأولي في الورقة ، لايتناقض مع اللون الأزرق الذي تلاه بأكثر مما يتناقض تغير ألوان الشمس عند المغيب مع تألق الشمس الساطعة عند الظهيرة . إن طريقتنا لملاحظة الشمس هي التي تبدلت . وكذلك الانتقال من الضوء الأحمر إلى الضوء الأزرق هو الذي يمنعنا من الاستمرار في رؤية الورق بلون أحمر . وكذلك رؤيتنا للإلكترون ، فإن نحن رأيناه على صورة موجة أو على صورة جسيم ، فليس في هذا تناقض ، وإنما يتوقف ذلك على الطريقة التي نلاحظه

بها . وحالنا معه كحالنا مع هذه الفتاة ذات الغرة . فنحن نستطيع أن نجعلها لطيفة بأن نتركها تتبختر وتتألق ، أو نجعلها خبيثة نتيجة « لتدخلنا » في شؤونها ورغباتها . وهكذا سيتبدل حال الفتاة تبدلاً سنجد بعده مشقة كبيرة في معرفة الفتاة أهي نفسها في الحالتين . وكذلك يمكننا أن نجعل الإلكترون في حالة جسيم بأن نجعله يتألق ، أو في حالة موجة بأن نبحث له عن « تداخل ».ولكنه على الرغم من ذلك ، سواء أكان موجة أم جسيماً ، فإنه يظل إلكتروناً ، وهو كالفوتون ، يظل أونديكولاً .

ــ بابا ، هل الإلكترون هنا أم هناك ؟

ــ نعم .

ــ هل هو موجة أم جسيم ؟

ــ نعم .

ومع ذلك ، فقد كنا صريحين إلى أبعد حد مع السائلة ! ولكي نعرف أهي حفظت الدرس أم لا ، دعونا نحن بدورنا نطرح عليها السؤال :

ــ أنت تعرفين عروس البحر ، فهل هي امرأة أم سمكة ؟

فإذا كانت الفتاة قد حفظت الدرس ، فلن تجد صعوبة في العثور على الإجابة المناسبة .

١٤ ــ صورة شاملة للعلم بعد الثورة

لقد حانت الآن لحظة تجميع الأفكار المشتتة كي نرى أي صورة سترسمها لنا .

يبدو أننا نستشف من خلف عالم المكان والزمان الذي نعيش فيه ، عالماً غامضاً مليئاً بالأسرار غير مألوف لدينا ، وخفياً كالسحر ، نرضخ بشكل ما لسيادته ، فقوانينه تبدو من الوجهة الرياضية مضبوطة ، وحوادثه تجري وفق سببية صارمة .

وليس لدينا وسيلة للنفاذ إلى هذا العالم سوى أن نقوم ببعض التجارب . غير أن هذه التجارب ليست سوى أدوات خرقاء ابتلاها القدر بعدم الدقة ــ التي حطمت سببيتها . ولما كانت تصوراتنا العقلية قد تشكلت على صورتها الخرقاء ، لذلك لم يكن لنا أمل في أن نكون لأنفسنا صوراً ذهنية في المكان والزمان، عما يجري في أعماق هذا العالم الخفي . فلم يعد ممكناً لغير الرياضيات أن تحاول رسم صورة لظواهر هذا العالم .

قد نظن بأن كل ما في العلم قد ضل أمام هذه اللاحتمية التي تفسد التجارب وتفكك أوصال السببية ، بل لربما أننا نعجب كيف يوجد علم عقلاني وأشياء أخرى غير العماء والفوضى . ولكن على الرغم من تخفي آلية مبدأ الارتياب المفصلة عن أبصارنا ، فإننا نكتشف في هذا المبدأ انتظاماً مذهلاً . فتلك التجارب التي تشوهها دائماً « لاحتمية » لامفر منها ، لاتزال تحمل على الرغم من كل ذلك ، آثار خلفية واضحة وأصيلة من الدقة والتحديد (هي شيء من الحتمية) . ولكنها إذا قورنت بتلك

الحتمية التفصيلية التي كان العلم الكلاسيكي يطالب بها ، بدت حتمية فقيرة لأكثر ، ولكن هذا لايمنع من أن فيها دقة لها قيمتها ، ويمكن أن يبنى عليها علم للقوانين الطبيعية .

ولكن طبيعة هذه الدقة نفسها متناقضة ، لأنها دقة قائمة على الاحتمالات ، بل هي في الحقيقة قائمة على احتمالات تشبه الأمواج ، ولها قدرة على التداخل . ولكن الاحتمالات لها سلطات كبيرة في سن القوانين ، بشرط أن تطبق على أعداد كبيرة . فلنتمعن قليلاً في نوع الثقة التي يمكن أن نوليها لها .

ففي لعبة النسر والكتابة (عند رمي قطعة نقود معدنية) ، تكون النتيجة غير متوقعة ، لأنها مسألة مصادفة ، إلا أنها ليست عديمة التحديد كلياً . فنحن نعرف أنه لايمكن أن يكون هناك سوى واحدة من حالتين ممكنتين . ثم إن الشيء الأهم من ذلك ، هو أننا إذا أردنا أن نرمي القطعة عشرة آلاف مرة مثلاً ، فإن باستطاعتنا أن نتنبأ بشيء من اليقين ، بأن نصف هذا العدد سيظهر النسر ، والآخر كتابة . ولاريب في أننا قد نخطئ من حين لآخر في مثل هذا التنبؤ ، إلا اننا نقبل حتماً بمخاطرة بسيطة كهذه حين نراهن على هذا التنبؤ . بل دعونا نكون أكثر صراحة في مواجهة هذه المسألة . فنحن نولي يقين هذه الاحتمالات في واقع الأمر ثقة أكبر بكثير مما نقر به أحياناً في سريرتنا حين نثير هذه المسألة على الصعيد المجرد . فمثلاً إذا قدم لنا أحدهم دولارين عن كل مرة يظهر فيها النسر بشرط أن ندفع له دولاراً واحداً عن كل مرة تظهر فيها الكتابة ، عندئذ هل نتردد بقبول هذا العرض ؟ إن علائم التردد إذا صادف وظهرت ، فإنها لن تكون لعدم ثقتنا بالاحتمالات ، بل على العكس ، إن فرط ثقتنا بها هو الذي يجعلنا نرتاب في وجود خدعة في هذا العرض المجزي ، حتى لنستبعد أن يكون عرضاً شريفاً . وفي أندية القمار ، حيث يلعبون الروليت ، يعوّل أصحاب النادي على الاحتمالات بهدف الكسب الذي يجنونه من هذه الألعاب . فهم يضعون ثقتهم في المصادفة ، وفي أن الصفر [1] ، أو الصفر المضاعف ، سيتكرر ظهوره مثله مثل أي عدد آخر ، فيكفل لهم نسبة منتظمة من حجم

(١) كل من راهن على اللون الأسود أو الأحمر أو على الزوجي والفردي إلخ يخسر عند مجيء الكرة عند الصفر ، ولايربح إلا من راهن على الصفر نفسه فالنادي يربح عندئذ من الجميع ما عدا ذاك الذي راهن على الصفر (المترجم) .

التعامل . ولكن قد يخونهم الحظ من حين لآخر . وفي مثل هذه الحالات يخسر النادي من صندوقه ، ذلك لأن للمصادفة أهواءها أحياناً ، ولاسيما إذا اقتصر اللعب على بضع مئات من دورات الروليت . كما تراهن شركات التأمين أيضاً على الاحتمالات ، إلا أنها تراهن على أعداد أكبر بما لايحد من الأعداد المدونة على قرص الروليت . ومع ذلك لم نسمع أن إحدى شركات التأمين قد أفلست . مما يدل على أنها تؤمن لأصحابها ربحاً وفيراً بفضل المصادفة . لأن الحالات التي يمكن أن يُعَوّل فيها على احتمالات محددة واضحة (في حالة أعداد كبيرة)، تصبح المصادفة فيها في نهاية الأمر يقيناً من الناحية العملية. ولقد بنى العلم الكلاسيكي نفسه ، فوق رمال الاحتمالات المتحركة ، (أو التي تبدو كذلك) نظرية تعد من أفضل النظريات إتقاناً وأكثرها نفعاً وعطاءً ، وهي النظرية الحركية للغازات .

وإذا كان هذا حال العلم الكلاسيكي ، فالأحرى أن يكون أيضاً حال عالم الذرة الجديد . ففيه يتوفر وجود الشرطين الأساسيين لتطبيق الاحتمالات ، وهما الاحتمالات المحددة الواضحة ، والأعداد الكبيرة جداً . فالاحتمالات فيه ، تناسب في وضوحها وتحديدها ، القوانين الرياضية الصارمة المضبوطة ، وأما الأعداد فتفوق الوصف في عظَمها حتى ليبدو عدد الأشخاص الذين يؤمنون عند شركات التأمين تافهاً بالنسبة لها . ولقد قدر العلماء وزن الإلكترون ، فهل تدري كم كان وزنه ؟ هل تزن المليون إلكترون قدر ريشة ؟ إن المليون لاتكفي ، ولاحتى المليار . إذاً لنقل مليون مليار فهي تصلح حتماً ؟ ولكن لا ، ولاحتى مليار المليار من الإلكترونات أو حتى مليون مليار المليار منها تزن قدر ريشة . بل يجب أن يبلغ هذا العدد مليار مليار المليار لكي يصبح أهلاً لأن نتحدث عنه بلغة الأوزان اليومية . لذلك ، إذا رأينا العلم قد تجاوز اليوم التخلف الناشئ عن عدم الدقة المتأصلة (أي اللاحتمية) ، فما ذلك إلا بفضل أعداد على مثل هذا القدر من الضخامة من جهة ، ولأن ميكانيك الكم قد اكتشف قوانين تحدد قيم الاحتمالات بدقة مذهلة . فهو بفضل هذه الأعداد الضخمة يستطيع أن يتنبأ بكل جرأة . وإذا اعترف العلم اليوم بكل تواضع ، بعجزه عن التنبؤ الصحيح بسلوك الإلكترونات أو الفوتونات أو أي

جسيمات أولية أخرى مأخوذة فرادى ، إلا أنه يستطيع أن يتنبأ ، برغم كل شيء ، وبكثير من الاطمئنان واليقين ، كيف ستتصرف هذه الكثرة من الجسيمات بكل دقة .

على أن هذه الدقة العظيمة في حالة الأعداد الكبيرة ، لم تمنع العلماء ، حين علموا بنبأ فشل الحتمية في العلم الأساسي (علم الصغائر) ، من أن يَحِنُّوا (كشأن البشر دائماً) إلى أيام الفيزياء الكلاسيكية الغابرة ، حين كانت الموجات موجات ، والجسيمات جسيمات ، وحين كان لدى العلماء صورة واضحة وسهلة عن تصرفات الطبيعة كلها ، بل حين كان المستقبل يمكن التنبؤ بكل تفاصيله ، ولو نظرياً على الأقل . ولكن هذه الأيام الغابرة لم تكن حقاً شاعرية كما تبدو الآن في ضوء حنين الذكرى الذي يزين الأمور بأكثر من حقيقتها ، بل كانت تقع فيها تناقضات عديدة مستحيلة الحل . وثمة مزيد من الوقائع المثبتة بما لايقبل الجدل ، تحطم كل ادعاءات هؤلاء الفيزيائيين الكلاسيكيين . فتلك الأيام السالفة ، لم تكن سوى أيام طفولة للعلم ، ولامجال للعودة إليها أبداً .

كما لايمكن أن نتوقف أيضاً عند هذا العلم الذي وصفناه إن نحن أردنا أن نتمم قصتنا بأمانة وإخلاص . ولذلك ، ولكي ننسى حنيننا الأبدي ، وصفنا عالماً من القوانين السببية مختبئاً تحت عالم المكان والزمان . وهو عالم يعتقد بعض العلماء النابهين بوجوده[١] ، بينما يشير غيرهم إلى أنه لايمكن البرهان عليه . ولذلك ينظرون إليه على أنه مجرد نزعة روحية غيبية توفر لهم الراحة الذهنية ، وليس نتيجة منطقية بسيطة .

والحقيقة أنه يصعب علينا أن نقرر أين يتوقف العلم وأين تبدأ الغيبيات ، فما أن ننتهي من نظرية ، حتى وإن كانت بدائية ، حتى نجازف في تأملاتنا الميتافيزيائية . ومع ذلك ، ومهما تكن نظرياتنا موقتة ، فإنها في الحقيقة تشكل نسغ الحياة لتقدمنا العلمي . لذلك يستحيل أن نتخلص نهائياً من الميتافيزياء ، ولكن إما أن نستمرئها جداً ، أو نمر عليها مرور الكرام . كما أنه ليس باستطاعتنا دائماً أن نميز الميتافيزياء الجيدة من الرديئة . لأن « الرديئة » قد تساعد على تقدمنا ، بينما « الجيدة » تؤخره . خذوا مثالاً على

(١) ومنهم د . بوهم David Bohm ولوي دوبروي (المترجم)

ذلك كريستوف كولومبس . فهو حين بدأ رحلته، كان يظن أن إبحاره المباشر غرباً يتجه به نحو اليابان . حتى أنه حين لامس الأرض ظن أنه نزل عند شاطئ أسيوي . ولم يطل به العمر لكي يرى أنه كان مخطئاً في ظنه . فهل تراه كان يقدم على هذه البعثة الخطرة لو أنه عرف المسافة الحقيقية التي تفصله عن اليابان ؟ وهكذا أيضاً نظرية الكم نفسها . فلقد نشأ جانب منها ، من إحساسات غريبة وأوهام راودت رجالاً مثل مكسويل وبوهر ودوبروي[١]. بل إن الفيزيائيين بعامة حين يتحدثون عن مدلول ميكانيك الكم ، يسترسلون إلى حد ما ، وتبعاً لأذواقهم الشخصية ، في روحانية صوفية . وهم يسبغون على تأويلهم لنظرية الكم لون شخصيتهم الخاصة ، شأنهم في ذلك ، شأن عدد من الرسامين الذين ينفذون على الطبيعة رسوماً مختلفة لنموذج واحد . ولكننا لانستطيع أن نهمل الحديث عن فكرة الكم الجدية المتزمتة التي أشرنا إليها سابقاً ، والتي وردت أيضاً في مثالنا عن قطعة النقود وعن مبدأ المشاكسة والعناد ، وإلا لكانت قصتنا ناقصة ، لأن وجهة النظر هذه هي التي يؤيدها كثير من الفيزيائيين .

فهؤلاء ، الفيزيائيين ، قانعون بقواعد لغة الرموز ، وبدقة الاحتمالات الخارقة وقوانينها الغريبة ذات الطابع التموجي التي تتحكم فيها ، وهم يعرفون أن من المستحيل متابعة الآلية المفصلة لهذه اللاحتمية التي يرشح من خلالها ، بطريقة لاتفسير لها ، قدر بكير من الدقة ومن القوانين . وهم يذكرون أحداثاً مؤلمة كتلك الجهود العقيمة التي بذلوها للبحث عن نماذج للأثير ، أو تلك المعتقدات السالفة الساذجة المتعلقة بالوضع والاندفاع ، والتي تبددت الآن أيما تبدد . فهذه التجارب علمتهم التروي والتبصر . لذلك تراهم الآن يركزون معظم اهتمامهم على قواعد لغة الرموز ، أو بالأحرى على الاحتمالات التي تصاحبها قوانين رياضية للفضاء الافتراضي المتعدد الأبعاد (أي تلك القوانين التي تخضع لها هذه الاحتمالات والتي حققتها الاختبارات التجريبية القوية بتأكيد ساطع) . ويؤكدون أن هذا الذي ذكر هو كل ما يمكننا أن نحلم بمعرفته بشكل معقول ، وأن العلم

---

(٢) لقد ظن هؤلاء أنهم يحلون مشكلة ولو بشيء من الفروض الشبيهة بالميتافيزياء كأثير مكسويل وامواجه ، ومدارات بوهر ، وموجة (دوبروي) . ولم يراودهم الظن أبداً في أنهم يفتحون بذلك باباً لا أحد يعرف أين مؤداه (المترجم) .

الذي يستعين بالتجارب لايصح له أن يتعمق إلى ما يختفي وراء هذه التجارب . لأن هذه الأمور الخفية هي أشياء لايمكن البرهان على وجودها ولو بشكل نظري .

فالرياضي الكبير ج . فون نيومن John von Neumann الذي حقق عملاً جباراً في تشذيبه لأسس نظرية الكم الرياضية ، برهن رياضياً أن هذه النظرية تشكل وحدها نسقاً تاماً . فلا هي بحاجة لعون سحري يأتيها من عالم خفي يختبئ خلفها ، ولاهي في الوقت نفسه تبدي إشارة لوجود مثل هذا العالم[1] . فلنقنع إذاً بقبول هذا العالم على علاته كما يظهر من خلال تجاربنا — حتى مهما بدا غريباً . فما نراه هو وحده صورة عالم العلم . وهل ترانا بعد أن عنَّفنا النظريين الكلاسيكيين بقسوة بشأن فرضياتهم غير المبررة — مع أنها ظاهرياً غير ضارة — نأتي نحن فنخترع هذا العالم الخفي ذا السببية الصارمة ، لا لسبب إلا بدافع حبنا لها . مع أنه سيكون ، بسبب طبيعته ذاتها ، غير مؤهل لأن يظهر نفسه لتجاربنا ؟ أليس هذا هو التهور الأحمق بعينه ؟ أليس من الحماقة أن نقدم في هذه الحالة على اختراع نظرية كيفما اتفق الأمر ، ولانعرف لها برهان ، ليكون حالها بعد ذلك كحال الوقائع المفصلة تحت مجهر هيزنبرغ ، أو حال تلك التصورات التي كنا نصف فيها الأونديكول وكأنه جسيم من النموذج القديم ، حتى في اللحظة التي سبقت مباشرة البرهان على أنه ليس كذلك ؟[2] .

إن هذه الخُطَب كلها عن الدقة ، لم تكن حين تسربت فيما مضى من خلال اللاحتمية (التي كانت خافية في ذلك الحين) ، سوى كلام بكلام . فعلينا أن نحرر عقولنا من مفاهيمها المزوقة السلفية ، وأن نأخذ نقطة بداية جديدة لنا ، هي قوانين ميكانيك الكم ، التي يجب أن نتخذها قاعدة ومخططاً تاماً للفيزياء الحديثة ، أو حتى وصفاً شاملاً لدنيا الكم التي لايوجد خارجها شيء يمكن أن يعد فعلاً من علم الفيزياء . أما فكرة السببية الصارمة ، فإن العلم لايكتفي بأن يحكم عليها بعد هذه السنوات كلها بأنها مفهوم أساسي ، بل هو يبرهن كذلك بحسب نظرية الكم ، بأن

---

(١) تبين بعدئذ (وكما سنرى في القسم الثاني) أن برهان نيومن ليس عاماً قطعياً (المترجم) .

(٢) هذه حجج لاتؤيدها الوقائع . فلولا التفكير في الأثير لما فكروا بقياس سرعة الأرض . ولولا هذه التجارب التي أثبتت ثبوت سرعة الضوء ، لما انبثقت النظرية النسبية (أو على الأقل لتأخر جداً ظهورها) المترجم .

السببية الصارمة هي من حيث الأساس والجوهر لايمكن البرهان عليها . فهي لم تعد إذاً مفهوماً علمياً حقيقياً ، ويجب إقصاؤها عن ميدان العلم الرسمي الحالي . وهذا ما عبر عنه ديراك بقوله : « **إن هدف الفيزياء النظرية الوحيد ، يقوم على حساب نتائج يمكن مقارنتها مع التجربة** . ولافائدة ترجى إطلاقاً من إعطاء وصف شافٍ لمجمل مجرى الحوادث » . إن الجملة التي شُدّد عليها هنا ، هي في الأصل مشددة عند ديراك . وليس باستطاعة المرء أن يمنع نفسه من التفكير بأن الجملة الثانية هي التي كان يجب التشديد عليها ، لا الأولى .

فلدينا الآن إذاً مخطط أضيق لعالم فيزياء الكم هو ، ويا للغرابة ، صورة أكثر تأنياً وروية ، وفي الوقت نفسه أكثر جرأة . وأما أنها صورة أكثر تأنياً ، فلأنها لاتذهب إلى أبعد من الحقائق البيّنة تماماً . وهي أكثر جرأة ، فلأنها تقبل النتائج وتكتفي بها . وهي لاتبالغ في استرسالها طليقة في التأمل . فهي لاتعدو كونها صورة فيزياء الكم الراهنة . ومعظم العلماء كما يبدو ، يؤيدونها . إلا أن هناك كما ذكرنا تلونات عديدة غير محددة في آراء العلماء . وغالباً ما نجد صعوبة قصوى في التمييز بدقة بين وجهة نظر هذا العالم وذاك الآخر .

على أن البعض يفكر بأن هذا الوضع ليس سوى مرحلة انتقالية ، وأن العلم كما يأملون سينتقل منه بعد حين إلى أيام أفضل ، وهناك آخرون تقبلوا هذا الوضع على مضض وحاولوا تليين غرابته بحيل مصطنعة ، (منها مثلاً إدخال أشكال جديدة للمنطق[١]) . كما قال بعضهم إن المراقب يخلق حصيلة مراقبته بفعل من مراقبته نفسها ، أي كما هو الأمر تقريباً في مثالنا عن لعبة الكتابة والنسر (بقطعة نقدية) . وهناك الكثير ممن ليسوا علماء ، وإلى جانبهم قلة من العلماء ، رأوا ، بعدما وجدوا أن العمليات الفيزيائية أصبحت محررة من قيود السببية الصارمة ، بأن هذا يعطي إمكانية جديدة لدعم الفكرة القائلة بحرية الاختيار الشخصي . وما زال هناك آراء وتأملات كثيرة مماثلة لهذه ،

---

(١) كالمنطق المتعدد القيم الذي لايكتفي بإطلاق صفة « صحيحة » و« خطأ » على القضايا ، بل يعتبر أن كل قضية مرفقة بواحدة من ثلاث قيم هي صفر (خطأ) ، ١ (صحيحة) ، ½ (بين بين) المترجم .

وهي تشهد كلها على قدرة ثابت بلانك ــ أو كَمّ الفعل h ــ على التوسع والانتشار . هذا مع أنه كمية يصعب علينا ، لشدة ضآلتها ، أن نصدق أن لها مثل هذه الفعالية ، حتى أنها تبدو في أعين غير العارفين تافهة لاأهمية لها .

ويفضـل البعض أن يـأخذ ميكـانيك الكـم على طبيعتـه كما هو ، بينما يـأبى آخرون ذلك مـا لم يكن محاطاً بهالة من التخيـلات والميتـافيزياء . وهذه على كل حال مسألة ذوق شخصي . أما الشيء الأكيد ، فهو أن هناك حقائق أساسية لايمكن لأحد أن يماري فيها ، لأنها حقائق صـلبة لاترد ، أعطتها تجارب مضنية أقرّ بها الجميع ولايمكن إغفالها ، مع أنها تخالف نهائياً طريقة التفكير الكلاسيكية .

وبكل صراحة، إنه ما من وسيلة مرضية بلغة المكان والزمان والسببية تكون صالحة لوصف العمليات الذرية الأساسية في الطبيعة .

ثم إن نتيجة التجربة على جسيم ذري بمفرده ، هي بوجه عام ،لايمكن التنبؤ بها ، بل كل ما يمكن أن نعرفه مسبقاً هو مجموعة من النتائج الممكنة المختلفة .

إلا أن النتيجة الإحصائية التي نصل إليها بعد ما ننفذ هذه التجربة عدداً كبيراً من المرات ، يمكن أن نتنبأ بها بيقين تقديري .

فمثـلاً ، لايمكننـا أن نتصـور كيف يمكن للإلكـترون أن يتشبـه فجـأة بالجسـيم لدرجة تكفي لأن يحدث وميضـاً واحداً ، مع أنه في الوقت نفسـه قريب الشبه جداً من الموجة ، حتى أنه يمر في ثقبين معاً في حاجز ويتداخل مع نفسه . وعلى الرغم من كل هذا يمكن أن نبرهن أن هذه الظاهرة لاتؤدي إلى أي تناقض . كما لايمكن أن نتوقع أين سيومض هذا الإلكترون ، مع أننا نستطيع أن نؤكد أنه لايمكن أن يومض إلا في بعض الأماكن وليس في غيرها . ولكن إذا أطلقنا سيلاً عارماً من الإلكترونات بدلاً من إطلاق إلكترون واحد معزول ، عندئذ نستطيع أن نتنبأ بدقة مفصـلة بشبكة التداخل المعقدة التي سيحدثها هذا السيل ، حتى لنستطيع أن نتنبأ بالإضـاءة النسبية في مختلف مناطق هذه الشبكة .

إن عجزنا هذا عن التنبؤ بالنتائج المتعلقة بجسيم مفرد ـــ وهو عجز لاتستطيع وجهة النظر الكلاسيكية إباحته على الرغم من وضوحه هنا ـــ هو ميزة ليست جوهرية فحسب ، بل إنها مقبولة في ميكانيك الكم كل القبول . ومادام ميكانيك الكم سيظل في نظرنا سارياً على كل شيء ، لذلك لامناص لنا من التسليم بأن هذا العجز أساسي ، ولافكاك لنا منه . أما إذا صادف واكتشفت وسيلة تتفوق عليه ، فإن هذا سيكون مؤشراً لانتهاء سلطان ميكانيك الكم بوصفه مخططاً أساسياً للطبيعة . وعندئذ يجب أن تأخذ مكانه نظرية جديدة أكثر تعمقاً . أما ميكانيك الكم ، فيجب أن يتراجع أمام هذه النظرية الجديدة ليصبح نظرية شرف يطلق عليها لقب محترم ، وصفيق إلى حد ما . وهو « نظرية كلاسيكية » .

والآن ، وبعدما اعتدتم قليلاً على هذه الأفكار الجديدة الغريبة ، دعونا نلقي نظرة على المدلول الكمومي لإحدى الحقائق التي تبدو لأول وهلة تافهة لامعنى لها ، وهي تلك التي تقول إن الإلكترونات متطابقة بحيث لايمكن التمييز بين أحدها والآخر . وهذه الظاهرة صحيحة أيضاً في حال جسيمات أخرى ، ولكن دعونا نتحدث ، بغرض السهولة ، عن الإلكترونات فحسب ، مع علمنا أن هذه المناقشة لاتقتصر عليها وحدها .

لنتخيل وجود إلكترون على هذه الصفحة ، وآخر على الصفحة المقابلة . ولنتمعن فيهما جيداً . إن التمييز بينهما أمر مستحيل . لنغلق بعدئذ أعيننا لحظة ، ونعود بعدها للتمعن فيهما . إنهما دائماً في مكانهما ، أحدهما هنا والآخر على الصفحة المقابلة . ولكن كيف نعرف أنهما لم يتبادلا مكانيهما عندما كانت أعيننا مغلقة ؟ قد تقولون إن هذا أمر لايحتمل حدوثه ؟ ولكن ألا تمطر عادة حين تخرجون من بيوتكم وتنسون نوافذها مفتوحة ؟ ألا تنقطع شرائط أحذيتكم حين تكونوا يومها بالتحديد على عجلة من أمركم ؟ فتذكروا إذاً أن الإلكترونات هي توائم حقيقية متطابقة ، وقادرة جداً على التخابث . ومع أنكم ستثابرون على تأكيدكم على استحالة تبادل إلكترونين لموضعيهما ، إلا أنكم على كل حال ، غير قادرين على إثبات هذه الاستحالة بطريقة أو بأخرى .

قد تكونوا غير مقتنعين بعد ؟ فلنعرض الأمور عرضاً آخر يختلف قليلاً عن سابقه . لنفرض أن الإلكترونين قد اصطدما وقذف أحدهما بالآخر . إنكم لن تستطيعوا ، بعد الاصطدام ، أن تقولوا أيهما هو هذا وأيهما هو ذاك .

قد تعتقدون أنكم قادرون ؟ وتظنون أن باستطاعتكم أن تثبتوا أنظاركم على الإلكترونين لكي لايزوغا عن نظركم ؟ ولكن لا ياسادة ، فهذا كان فيما مضى ، ورحلت أيامه . إن النظر باستمرار إلى أي شيء في عالم الكم أمر مستحيل . وكل ما نستطيع عمله هو قصف الشيء بالفوتونات بشكل متواصل . ففي كل اصطدام إذاً يقفز الإلكترونان ولكن لانعرف كيف . وإنما نعرف ، بحسب ما رأينا منذ قليل ، أن باستطاعتهما أن يتبادلا مكانيهما دون توقف . وأن احتمال زوغانهما يزداد بوجه خاص عند الاصطدام . فلنسلم إذاً بأننا لانستطيع أبداً أن نكون على يقين من هوية كل إلكترون .

لنفرض الآن أننا نريد كتابة معادلات كمومية للإلكترونين . إننا مضطرون في بادئ الأمر ، بحسب الوضع الراهن لنظرياتنا ، إلى اعتبارهما إلكترونين متمايزين . لذلك سنقول إن هذه الإحداثيات تخص الأول ، وتلك تخص الثاني . ولكن هذا التخصيص غير مشروع ، لأننا بذلك نتجاوز الحد في إعطاء المعلومات . إذ إنها ستعني أن كل إلكترون قد احتفظ بهويته . في حين أنهما يجب أن يذوبا في تكتل واحد مغفل . لذلك يجب أن نصحح بشكل ما هذا الخطأ الذي بدأنا به ، وأن نجرد الإلكترونين من هذه الفردية التي ليست من حقهما . وهذا ليس بالأمر الصعب ، بل يكفي أن نظهر التناظر بين إحداثياتهما . بمعنى أن علينا أن نكيف معادلاتنا بحيث أن المبادلة بين الإلكترونين لن يكون لها أي أثر فيزيائي يمكن كشفه في الحلول التي تعطيها هذه المعادلات .

إن اشتراط فقدان الهوية الفردية هذا ، يشكل تضييقاً رياضياً خطيراً يؤثر بشدة في سلوك الإلكترونات . ومن بين الطرق المختلفة الممكنة للتعبير عن هذا الشرط ، هناك طريقتان بسيطتان من الوجهة الرياضية . وقد تبين أن هاتين الطريقتين بوجه خاص ، لهما أهمية فيزيائية . إحداهما تؤدي إلى سلوك نشاهده فعلاً في حالة

الفوتونات والجسيمات ألفا (α) وجسيمات ذرية أخرى . وأما بحسب مدلول الطريقة الثانية ، فإن الجسيمات سيهرب أحدها من الآخر ، إذ إنها تؤدي بدقة إلى مبدأ الاستبعاد الغامض الذي اكتشفه باولي .

وهذه ، حقاً ، نتيجة تسترعي الاهتمام ، وانتصار مدو لميكانيك الكم . بل ستكتسي أهمية أبعد عندما نعلم أن جميع الجسيمات الذرية التي لاتخضع لمبدأ باولي ، تسلك كلها سلوك الفوتونات والجسيمات ألفا . وهذه أقصى نقطة بلغناها إطلاقاً من فهمنا للمعنى العميق لمبدأ الاستبعاد ، وهي مع ذلك إقرار بالفشل ، إذ بدلاً من أن نبدأ مباشرة بفقدان الهوية الفردية ، أي من اللافردية ، بدأنا بافتراض الفردية ، ثم نفيناها بعد ذلك . إلا أن مبدأ باولي أعمق من هذا بكثير ، إنه في الصميم نفسه من قلب الطبيعة المغلفة بالأسرار . ولربما أتى يوم تظهر فيه نظرية أعمق من نظرية الكم ، فيحتل فيها مبدأ الاستبعاد مكانه اللائق . وبانتظار ذلك اليوم ، ما علينا إلا أن نكتفي بحدسنا الراهن المبهم ..

إن التعبير رياضياً عن إلغاء الفردية في المعادلات ، يغير شكلها ويؤدي إلى إحداث تأثيرات عجيبة يستحيل علينا تفسيرها تفسيراً مضبوطاً بالعبارات المجازية والصور الخيالية . كما أنه يستدعي وجود قوى تبادلية غريبة . ولكن هذه القوى ليس لها ما يماثلها في الفيزياء الكلاسيكية . هذا على الرغم من أنها ظهرت أصلاً في ظروف أخرى في ميكانيك الكم .

وكان لنا الحق في أن نشتبه بوجود قوى من هذا القبيل . لأن من السذاجة بمكان أن نعتقد بأن هناك مبدأ كمبدأ الاستبعاد يقاوم التجمع بصرامة وحزم ، وهو مع ذلك لايحتاج إلى قوة تساعد على ذلك ولو كانت خفية .

وهنا نتساءل ، هل نحن حقاً على يقين بأننا لن نستطيع إيجاد تفسير صحيح يسهل تصويره لهذه القوى التبادلية ؟ فالقوة على كل حال ترافقها طاقة ، والطاقة يصحبها تواتر ، وذلك بحسب قانون بلانك الأساسي (في نظرية الكم) ، كما أن التواتر ، يمكن أن نرفق به نوعاً من الاهتزاز . إذاً ، إذا أغفلنا القوى التبادلية نفسها ،

وحصرنا اهتمامنا في الاهتزازات المرافقة لها ، فعندئذ ربما ننجح في وصف الآلية التي تتطلب إدخال هذه القوى . فها هي إذاً بأيدينا فكرة تبشر بالحل . ولكن إذا كان هذا هو الوضوح الذي نبحث عنه ، فهو بلاريب سيخيب أملنا .

حقاً أن هناك اهتزازاً ، ولكن ياله من اهتزاز خيالي . إنه تبادل رتيب لهويات الإلكترونات . إذ إن الإلكترونات لاتتبادل فيه أمكنتها بالصورة الحسية التي نألفها . بأن تجتاز الفضاء الفاصل بينها ، وإلا لكان هذا سهلاً للغاية ، بل يحدث بينها نوع من مد الفردية وجذرها باستمرار . لنفرض مثلاً ، في بادئ الأمر ، أن هناك إلكتروناً A على هذه الصفحة ، وهناك إلكتروناً B على الصفحة المقابلة . فبعد لحظة سيكون لدينا هنا شكل من الخليط الذي يحوي ٦٠٪ من A و ٤٠٪ من B ، أما هناك فيكون لدينا خليط يحوي ٤٠٪ من A و ٦٠٪ من B . وبعد قليل ستصبح B بأكملها على هذه الصفحة ، وA بكاملها على الأخرى ، لأنهما سيكونان قد تبادلا هويتيهما كلياً . وعندئذ ينقلب اتجاه التبادل . ويستمر هذا الاهتزاز العجيب بلا توقف إلى ما لانهاية له . فمع هذا النوع من خفقان الهوية الفردية (أو مد الفردية وجذرها) تقترن قوى مبدأ الاستبعاد التبادلية . وهناك نمط تبادل آخر يمكن أن يكون ذا شأن حتى في حالة إلكترون معزول . إذ يمكن أن يوصف هذا الإلكترون أيضاً بأنه يهتز بهذا الشكل الغريب اللامادي بين وضعين مختلفين .

وقد يكون قبولنا بهذه الخفقات (النبضات) الغريبة أيسر علينا فيما لو اعتبرنا الإلكترونات أمواجاً لاجسيمات . لأننا نستطيع عندئذ أن نتخيل الأمواج الإلكترونية يتراكب بعضها مع بعض . وهذه ظاهرة يسهل فهمها من الناحية الرياضية ، ولكنها من الناحية الفيزيائية تستعصي على التمثيل . بينما إذا تمسكنا بالمظهر الجسيمي للإلكترونات ، بدا عسيراً علينا عندئذ تصور شيء يشبه خليطاً من ٦٠٪ من A و ٤٠٪ من B ، حتى فيما لو أمكن لنا مشاهدة ذلك . وهذا ، على كل حال ، غير ممكن . لأن فعل المشاهدة نفسه سيؤثر في الإلكترونات بصدمة تجعلنا نكتشف إلكتروناً A أو إلكتروناً B ، ولكن ليس أبداً خليطاً من الإثنين ، والنسبة المئوية في الحقيقة تمثل بالتحديد احتمال أن نجد هذا الإلكترون أو ذاك . فنحن هنا أمام وضع يشبه المثال المعبر في لعبة الكتابة والنسر . إذ إن قطعة النقود تنتقل وهي في مهب الريح بين الكتابة والنسر على التناوب ،

مارة بجميع الاختلاطات التي تتوسط بينهما . أما حينما تحط على الطاولة ، أي في اللحظة التي نكون قد أعددنا فيها العدة لرؤيتها ، سيكون هذا الإعداد قد أثر فيها بهزة لايمكن أن ينتج عنها إلا كتابة أو نسر .

وهنا قد يتبادر للذهن بعض الاعتراضات ، ولكننا ، وإن كنا نستطيع الرد عليها على الأقل ، إلا أن هذه السيرورة التبادلية تظل مفهوماً يصعب الإمساك به أو فهمه بوضوح . وإنه لمن الغريب والمرعب إلى حد ما ، أن نفكر بأني أنا وأنت نتبادل بشكل دوري بعض جسياتنا ، وأن هذه الجسيات نتبادلها أيضاً مع الأرض وما عليها من حيوانات ، ومع الشمس والقمر والنجوم ، وهكذا حتى أبعد المجرات .

ويقدم لنا تكافؤ العناصر الكيماوية مثالاً مدهشاً عن هذه التبادلات . إذ إن القوى التبادلية الغامضة هي التي تلعب الدور الأساسي في تجميع الذرات إحداها مع الأخرى ، بحيث تتبادل إلكتروناتها الخارجية هوياتها وأوضاعها بوتيرة لاتنقطع ، ناسجة بذلك رابطة تجمع الذرات بعضها مع بعض في جزيئات متماسكة .

تلك هي المفاهيم الرائعة التي أعطتها ثورة الكم . فلقد اهتز العلم في هذه الفترة الصاخبة حتى أعمق أسسه ، ونال في أيامها ميثاقاً جديداً ، كما استنار مدلول منهجه العلمي نفسه بضوء جديد. فخرجت الفيزياء التي كتب لها البقاء، بعد هذه الثورة ، وقد تبدلت تبدلاً عميقاً ، وجرى على مفاهيمها بمجملها تعديل جذري عميق . فبينما كانت فيما مضى تبحث مطمئنة عن نموذج آلي دقيق للطبيعة ليكون بمتناول الجميع ، نراها اليوم تكتفي بصيغ مجردة سرية ، لايستطيع خيالنا الرياضي الفقير أن يستعرضها بوضوح . فيا ترى أما زالت الفيزياء جريئة كما كانت في أيامها الماضية ، أم تراها قد أخر هذا الانقلاب الصميمي صحتها وأضعف قدرتها ؟ وهل كان ميكانيك الكم دليلاً على تقدمها أم على تراجعها ؟

فإذا كان دليلاً على تراجعها ، فقد أتاح لها هذا التراجع الذي كان مجرد مناورة استراتيجية ، أن تتخلص من حتمية الفيزياء الكلاسيكية الخانقة التي كانت تقيد وتعرقل إلى حد ما نشاط القوى العاملة في العلم . وحتى لو سلمنا بأن العلم

سيصطدم يوماً ما من جديد بسببية عميقة ، فإن حتمية القرن التاسع عشر ، على كل حال ، أصبحت تبدو بسرعة على الرغم من مكتشفاتها العظيمة ، عائقاً أمام التقدم . وعندما اكتشف بلانك لأول مرة وجود الكم الضئيل ، بدا أن ليس له مكانة في حقل الفيزياء الواسع . ولكن تبين ، في أقل من ربع قرن ، أنه قادر جداً على التغلغل في كل مكان حتى في أصغر ركن وأقل شق . وامتد تأثيره إلى مناطق لم تكن تخطر في بال ، حتى لقد تبدل وجه العلم بمجمله تبدلاً عميقاً ، وانتهى به الأمر أخيراً بأن فجر بعنف حواجز الحتمية ، وأطلق العنان لقوى التقدم ، التي كانت محجوزة خلفها ، لكي تنشط في السهول العذراء الخصبة التي كانت محدودة بها ،وليجني منها محصولاً خرافياً من الاكتشافات ، هذا مع مواصلة استفادته من جميع البنى العظيمة التي شيدها العلم في الميدان الكلاسيكي . بل لقد اصبحت النظريات القديمة نفسها اشد متانة مما كانت عليه ، كما ظلت انتصاراتها سليمة لم تمس ، وتضاءل ضعفها ، لأن نشاطها أصبح الآن معترفاً به في كل مكان يكون فيه تأثير الكم مهملاً إلى حين . ولم تعد جوانب ضعفها ألغازاً تسبب القلق وتهدد بإفساد البناء وتدميره . إذ دلت الفحوصات المختصة أن بناها الكلاسيكية يمكن أن تستخدم لغايات دقيقة معينة . وحتى معايبها نفسها ، تبين أنها جانب صالح ومفيد ، لأنها تدعم بقوة هذه الأفكار الجديدة التي تتسامى على القديمة دون أن تنال من فائدتها المحدودة .

حقاً أن النظرية الجديدة ، المشوشة في نظر غير العارفين ، كانت أبعد نظريات الفيزياء شأواً في التجريد ، إلا أن تجريدها لن يكلفنا سوى عبء زهيد جداً تجاه نتائجها العظيمة المذهلة . ولاغرو ، فنظرية نيوتن نفسها سبق أن بدت في زمانها وكأنها لاتصدق ، وكذلك بدت نظرية مكسويل . ولكن ميكانيك الكم ، مهما بدا غريباً ، فإنه يستند على كل حال إلى قاعدة تجريبية صلبة وأساسية . فبهذه النظرية ، أصبحنا نملك أخيراً نظرية قادرة على فهم تلك الحقيقة البدائية البارزة جداً في عالمنا المادي ، أي تلك الحقيقة البسيطة المألوفة التي وقفت نظرية مكسويل أمامها عاجزة مشلولة ، ونعني بها استقرار مختلف العناصر الكيماوية مع خواصها الفيزيائية والكيميائية ، بشكل دائم . ولكن النظرية الجديدة أيضاً لم تتجمد أو تقتصر على هذا الاستقرار ، فقد شمل تفسيرها أيضاً تحولات النشاط الإشعاعي . فبهذه النظرية ، أصبحنا نملك أخيراً

نظرية قادرة على تفسير جميع التفاصيل الدقيقة لمعطيات التحليل الطيفي المعقدة ، ولقد غزت هذه الأفكار الجديدة بتفسيراتها المفعول الضوئي الكهربائي وظواهر أخرى مماثلة ، كما وضحت آثار التداخل التموجي التي كانت تبدو في أول الأمر معارضة لها . وانطوى سبين الإلكترون بيسر ونجاح في هذه النظرية بفضل النظرية النسبية . كما اكتسب مبدأ الاستبعاد مضموناً أوسع ربحت الكيمياء بواسطته قاعدة جديدة كانت بمثابة علم جديد تقريباً ، إذ أصبحت الكيمياء النظرية قادرة على حل مسائل كانت تبدو حتى ذلك الحين بعيدة عن متناول النظريين . ولقد استطاع ميكانيك الكم ، ولاسيا مبدأ الاستبعاد لباولي ، أن يطور بكل نجاح نظرية المغناطيسية في المعادن ، كما مسح بما يشبه المعجزة جميع الصعوبات التي كانت تعرقل النظرية المتعلقة بمرور الكهرباء عبر المعادن . ولكن نواة الذرة كشفت بعد حين لنظرية الكم الجديدة عن أسرار لاتقدر قيمتها سنتحدث عنها فيما بعد . وهي أسرار كان من المستحيل على النظرية الكلاسيكية كشفها ، لأن هذه النظرية كانت أكثر تخلفاً من أن تستطيع وضع يدها على هذه الأسرار . وهي أسرار كان يتعذر النفاذ إليها حتى أنه لايمكن التعبير عنها بطريقة غير طريقة لغة الكم . ومهما كان فهمنا ضئيلاً ومجزوءاً للقوى الرهيبة الموجودة في باطن الذرة ، إلا أنه سيغدو أكثر ضآلة لو أن نظرية الكم لم تلقِ الضوء على أبحاثنا ولم تشجع جهودنا لفهم هذه الأسرار في المناطق الأخاذة الغامضة في الكون . وليس هذا الذي ذكرناه سوى لمحة موجزة عن نتائج ميكانيك الكم التي لاتضاهى . فنجاحاتها ، والدلائل القوية التي تؤيدها ، أكثر من أن نستطيع تعدادها هنا ، إنها باختصار ساحرة رائعة !.

« بابا ، هل يعرف العلماء حقاً عن ماذا يتكلمون ؟ » .

فأمام طفلة ملحاحة كهذه ، لاتكف عن السؤال ، قد نطلق لأنفسنا العنان أحياناً في مبالغة مؤسفة . ترى هل كان ردنا بالإيجاب أميناً حقاً في هذه الحالة الخاصة ؟ (انظر القسم الأخير من الفصل السابق) .

لقد كان أميناً بكل تأكيد حين ورد في سياقه ، إذ أعقب مباشرة السؤالين الآخرين . ولكن ما قولنا به الآن وقد ورد وحده هنا ؟ هل يعرف العلماء حقاً عن ماذا يتكلمون ؟

لو أننـا تركنـا للشعـراء والفـلاسفـة والكهـان أن يقـرروا الرد ، لكـان قرارهم ، وعلى مستوٍ رفيع ، معارضاً للفيزيائيين بكل تأكيد ، وحتى دون الرجوع إطلاقاً إلى ميكـانيك الكـم . أما على صعيد رفيع جداً ، فإن الشعراء والفلاسفة والكهان هم أنفسهم قد يصعب عليهم التأكيد بأنهم يعرفون عن ماذا يتكلمون . ولكن العلم ، وعلى بعض مستوياته المتدنية جداً ، ضبطهم ، وضبط نفسه أيضاً ، في حالة تلبس بارتكاب الخطأ .

إن الكـون ، فعـلاً ، شـيء آخـر غـير مجرد تنـاسـق بـين معطيـات تجريبية موضوعية ، وهو ليس خليطاً من النظريات والمجردات والفرضيات التي تبنى لتأمين الترابط بين المعطيـات . إنه شيء آخر في الحقيقة يختلف عن مجرد بناء هندسي لا على التعيين صيغ ليكون على صورة هذه الموضوعية الميتة الباردة . لأن هناك عالماً آخر أكثر عمقاً من كل هذا الذي ذكر وأشد التصاقاً منه بالذات ، إنه عالم صنع من الأحاسيس والعواطف والقيـم الجمالية والأخلاقية والدينية . وهذا العالم ، مازال إلى اليوم بعيداً عن متناول العلم الموضوعي . إنه بهيمنته المهيبة على الكون ، وعدم قدرتنا على النفاذ إلى أعماقه أو تجنبه، يحتل مكان الصدارة في سر هذا الوجود الرهيب نفسه الذي يحير العقول بلغز أبدي .

ولكـن دعـونـا نهبـط من هـذه المـرتفعـات لكـي نعـود إلى مستـو أقرب إلى أرضنـا . لأن الفـيزيائي الكمومي يمكن أن يضع أمامنـا هنـا ، أي على هذا المستوي ، حالة نموذجية ذات أثر فعالٍ فعلاً ، أو حالة مثالية مدعومة بمزيد من التجارب التي لاتعد ، والتي تتتالى لتشكل دليلاً مذهلاً في قوته . حتى لنتساءل ، ترى أين نجد دليلاً ساحقاً كهذا ؟ فكيف نجرؤ إذاً على الشك في صلاحية نظام كهذا سجل مثل هذا العدد الكبير من الانتصارات ؟ في حين أن هناك أشخاصاً ركزوا على أدلة هي بالمقارنة مع هذه تبدو خالية إلى حد بعيد من أي معنى . ففيزيائيو الكم يعرفون إذاً ، وبكل تأكيد ، عن ماذا يتكـلمون . إن نظرياتهم الراهنـة هي بلا أدنى شك ، نظريات سـيرورات الكون نفسها . ولايمكن للطبيعة الفيزيائية أن تكون شيئاً مختلفاً جداً عما انكشف لنا أخيراً بعد كل هذا العناء .

ومع ذلك ، إذا كان هـذا هـو اعتقـادنـا ، فـلا ريب في أن سـردنـا لقصتنا كان عديم الفائدة . ذلك أن التاريخ يذكر لنا تصاريح مماثلة . منها مثلاً هذا التأكيد الصريح الذي يعود إلى عام ١٨٨٩ : « إن نظرية الضوء التموجية ، هي ، من وجهة نظر الإنسان ، نظرية أكيدة » .

والذي أطـلق هـذا الحكـم الجريء لم يكـن متنبئـاً غـير مسـؤول ، ولانصف عاجز يمكن أن نهمل جهوده الضائعة . إنه العالم الذي أظهرت تجاربه أكثر من أي عالم آخر ، الطبيعة الكهربائية للموجات الضوئية . إنه الرجل العظيم هنريش هيرتز شخصياً الذي كانت ملاحظته الشخصية العرضية في الظاهر ، تحوي البذرة التي نبتت منها النظرية الجسيمية للضوء من جديد نشيطة قوية .

ألم يسبـق أبداً لعـلمـاء الفـيزيـاء الكـلاسيكيـة أن أبرزوا أدلة قـاطعـة لصالح نظريات تبدو لنا الآن ناقصة سطحية إلى حد بعيد ؟ ألم يعتقدوا عامة أن الفيزياء كانت قريبة من نهايتها وأن مسائلها الرئيسية قد حلت ، وأسسها قد انكشفت لآخرها ، وأنه لم تبقَ عليهم سوى بعض أعمال التشذيب والتكملات الجانبية ، وهذا ما انتظروا أن تقوم به الأجيال القادمة ؟ ثم ألم يدم هذا الاعتقاد إلى يوم أن اطلعوا على مسائل غير محلولة كفضيحة فوق البنفسجية والمفعول الضوئي الكهربائي وتفكك العناصر المشعة ..

إن الأدلة التجـريبيـة في العـلم ، لايمكـن أن تعـد بـراهـين حـاسمـة ، إذ إن التجربة ، باعتبارها الحكم الأعلى في العلم ، تشبه إلى حد ما عرافاً يطلق نبوءاته الدقيقة الواقعية والإيجابية بلغة مغلفة بعبارات خادعة . خذوا مثلاًسلم بالمر . ففي حين كان هذا المعطى التجريبي يمثل بالنسبة لبوهر مدارات وقفزات ، أصبح هذا السلم نفسه يمثل لشرودنجر كياناً ψ يكتسي بمظهر سديمي . ولكن هذين التصورين ليس بينهما واحد مقبول حالياً . وحتى قياس سرعة انتشار الضوء في الماء ، وهي التجربة التي كانت تبدو حاسمة ، وصممت ، بالتحديد ، لتحسـم الأمر بين الموجة والجسـيم ، هذه التجربة ، كشفت عن حقيقة أسيء تأويل مضمونها . والأمثلة على ذلك كثيرة في تاريخ العلم . وكل تغير يطرأ على النظرية ، يبرهن من جديد على أن يقين التجربة كان غير أكيد . فمن

المجازفة ، حقاً ، بمكان ، أن نؤكد أن العلم قد امتلك أخيراً نظريته النهائية ، وأن نظرية الكم كما نعرفها الآن ، ستحافظ على شكلها دون أن يتناولها تعديل مهم . ولانقول إن هذا غير جائز ، ولكن يستحيل البرهان عليه . وما من شك في أن التجارب السابقة تعارضه أكثر مما تؤيده . فهل يعرف فيزيائيو الكم حقاً عما يتكلمون ؟ إنهم يعرفون على الأقل هذه الحقيقة ، وهي أن معرفتهم مهما بدا في يوم من الأيام أنها خاطئة ، إلا أنها في الوقت الراهن أفضل بكثير من سابقاتها الكلاسيكيات ، وهي تقف على أرض صلبة لم تقف على مثلها نظرية أخرى . وهذا وحده يجعلها أهلاً للجهد الذي بذل لمعرفتها .

والحق أن العلم الأساسي لم يشهد أبداً تفجراً في عطاءاته وانتصاراته كما في هذا العهد . فمع تطور المفاهيم الثورية المتزامن مع النسبية والكم ، مرت الفيزياء بتجربة عاصفة من الانقلابات والتحولات لم يسبق لها مثيل في تاريخها . فلقد أخضعت النظريات الجديدة للفحص الدقيق ، تحركات السماء بكل جلالها وعظمتها ، وارتعاشات الذرات الداخلية وما في داخلها ، وحركت هذه الثورة المزدوجة مفاهيم كانت راكدة ثابتة عند الإنسان ، فطورتها ، مثل مفهوم المكان والزمان والمادة والإشعاع والطاقة والاندفاع وحتى العلم نفسه والكون أيضاً . وقد تتبعنا في قصتنا مجرى حياة الكم الخاطفة في أثناء تلك السنوات الأسطورية ، منذ أول ظهور متردد لها في ذهن العلماء الموهوبين ، مروراً بسنوات صباها المبكرة القلقة ، حتى تراجعها الأولي الموقت في نظرية بوهر البدائية ، أي حين تهيأت لتلك القفزة الهائلة العجيبة التي وصلت بها إلى سنوات نضجها وقلبت مشهد العلم المنظم وحولته إلى ساحة معركة مضطربة . وشيئاً فشيئاً بدأ يبرز من هذه القوضى منظر عام جديد للعلم لم نكد نتعرف ملامحه ، إنه هادئ واسع الشمول ، يليق في نظامه وضيائه غير المألوف بالعلم كمنظر عام .

وقد لقيت هذه الأفكار الجديدة لدى ظهورها لأول مرة ، نفوراً من العلماء الكلاسيكيين الذين تعلقت أذهانهم بالأعراف التقليدية ، ووجدها العلماء الشبان أنفسهم ، في ذلك العهد ، على الرغم من ليونة عقولهم ، غامضة محيرة . غير أن الجيل الجديد من فيزيائيي أيامنا هذه يتغذون من هذه الأفكار الكمومية بشهية الأطفال الذين يستعذبون ذلك الشراب الكريه ، زيت كبد الحوت ، غير مبالين بالشكوك

والمخاوف التي كانت تتأكل إخوانهم الكبار وتقلق راحتهم . وهكذا ينضاف حالياً إلى كل الدعم والتأييد والأدلة العلمية ، بكل لائحتها الطويلة ، شاهد جديد يخرج من أفواه الأجيال الجديدة . فها هو الكم إذاً قد أصبح أخيراً ينتصب أمامنا . لقد انتهت قصتنا ، فلنسدل الستائر .

ولكن لا ، فنحن المشاهدين سنقف محتجين ، حتى قبل أن تسدل الستائر ، لأننا مازلنا غير راضين . نحن لسنا مختصين بالفيزياء الذرية ، ولكننا بكل بساطة ، أشخاص عاديون ، ننصرف كل يوم لشؤوننا . ولكن دعونا نلقي في المساء ، حين نعود ، نظرة خاطفة في غفلة من العالم النظري ، لكي نأخذ فكرة عن المشهد الساحر الذي يراود تفكيره . ترى هل حقاً أن قضية « الأونديكول » وغياب السببية في المكان والزمان ، هي شيء يمكن للنظري الآن أن يقبله بجدية ؟ أباستطاعتنا نحن أيضاً أن نتعلم كيف نتلقاه ببعض مشاعر الرضى ؟ أو هل باستطاعتنا ، أمام عالم عدواني كهذا ، أن نفعل شيئاً آخر غير أن نرتعد خوفاً ؟ إنه عالم بعيد جداً عن تجربتنا اليومية ، ولايوفر لنا حتى أدنى قسط من الراحة العقلية ، إنه يدعونا للاقتراب بكل جفاء . فما أشد حزننا في أن نرى العلم يتطور على هذا النحو الغريب المؤسف الذي يزداد بعداً على الدوام عن معتقداتنا التي نؤثرها . إننا — لكي نتعزى بعض العزاء — نقنع أنفسنا بأن هذا الاضطراب موقت ليس إلا ، وأن العلم لابد سيجد يوماً ما الطريق المأمونة التي تعيده إلى النظامية ، فقد يفهم عندها غير العارفين من جديد رسالته البسيطة الواضحة ، الخالية من جميع المفارقات المجردة .

ولكن علينا أن نتذكر أن هذا هو شأن الناس دائماً كلما ظهرت إلى الوجود فكرة جديدة وجريئة ! سواء أكانت تلك الفكرة صائبة أم خاطئة . فعندما أعلنوا لأول مرة أن الأرض ليست مسطحة ، ألم يكن طرحهم هذا (في ذلك العهد) مفارقة شيطانية هدامة مثلها مثل أي فكرة صادفناها في قصتنا عن الكم ؟ إذ لابد أن هذا التصور قد بدا لمعظم الناس في أول الأمر خيالياً محضاً ، مع أن هذا التصور يسلم به الأطفال اليوم بكل سهولة ودون تفكير ، على الرغم من مخالفته لما يتبينونه بحواسهم مباشرة ، حتى أنهم قد يجدون منذ طفولتهم فرصة للتندر من كل مخبول ينفرد بالتصريح بإصرار بأن

الأرض مسطحة . والهاجس الوحيد عند الأطفال (هذا إذا وجد) هو راحة الناس المساكين الذين يعيشون في النقطة المقابلة مباشرة من قطر الأرض . فهؤلاء ــ بحسب تفكير الأطفال النشيط ــ حكم عليهم بأن يعيشوا حياتهم كلها وهم يمشون على رؤوسهم . فلعل اللهيمن علينا بحكمة سياسته وبركته الإلهية لكي يخرج أطفال أطفالنا مستعدين لقبول فظاعات الكم الحالية بسهولة ، ولكي يضحكوا من مخاوف أسلافهم السذج وشكوكهم . فهؤلاء المساكين (الأسلاف) ظلوا يعتقدون بأمواج وجسيمات أيام زمان ، وبحتمية السيادة الوطنية المطلقة ، وبكل خزعبلات العهد البائد الأخرى .

إن قيمة الثورة الكمومية ومدلولها ، إذا أردنا أن نقدرهما ، فيجب ألا يرتكز تقديرنا لهما على مشاعرنا العادية ، بل على منطقها الداخلي هي (أي على الثورة الكمومية) .

وهنا قد تقولون : « ماذا ؟ منطقها الداخلي ؟ إن آخر ما يمكن أن نعترف به هو هذه الصفة . صحيح أننا أجبرنا على قبول أدلتها التجريبية الساحقة ، أما منطق داخلي ، أو حالة وجد وتصعيد تنتزع إيماننا بها فلا ، فإما تجربة أو لاشيء ؟ كلا ، هذا فوق احتمالنا .. فحتى الأفكار الجديدة لايمكن قبولها بسهولة وبشكل طبيعي ، وهذا اللغو كله لن يبدل من واقعها شيئاً . صحيح أن التجربة أرغمتنا على قبولها ، ولكننا (حتى الآن) لم نتمكن من الإحساس بضرورتها الملزمة . فنحن لم نقبلها إلا بصعوبة وبعد مقاومة عنيدة . ولانتصور أبداً أن مدلولها العميق سيتجلى لنا يوماً ما فجأة . فعلى الرغم من أن الطبيعة تقف إلى جانبها ، إلا أن طبيعتنا تقف في الطرف الآخر تماماً . فكيف نقول « منطق داخلي » ؟ كلا ، هذا هو المرارة عينها .

ولكن ما وجه الغرابة ، فقد تكون هناك إمكانية أخرى غير التي ألفناها أنا وأنتم ، فلربما كانت نظرية الكم تحوي رغم كل شيء منطقاً داخلياً .. بل لربما أمكن لنا أن نرى فيها كشفاً بسيطاً إلى أبعد الحدود . حتى أن أفكار العلم السابقة تبدو في ضوئه سخيفة تشبه قولنا الآن إن الأرض منبسطة . دعونا نتذكر أن مفهومي المكان والزمان عندنا قد ولدا من تجربتنا اليومية ، وأن تجارب العلماء الدقيقة هي التي شذبتهما

شيئاً فشيئاً ، فكانا كلما زادت التجارب دقة ظهرا بمظهر جديد . حتى أن تجربة ميكلسون ومورلي نفسها عام ١٨٨٧ ، على الرغم من سطحيتها النسبية ، تمكنت في النهاية من قلب العديد من مفاهيمنا حول المكان والزمان عندما ظهرت النسبية (التي استندت إليها) . وأخيراً هانحن نكتشف اليوم بفضل التقنيات البالغة التعقيد التي يستخدمها الفيزيائي الحديث ، أن المكان والزمان كما نتصورهما عادة ، أو حتى المكان والزمان كما تراهما النسبية ، هما بصراحة ، غير ملائمين للآلية الدفينة التي كشفت عنها التجارب الذرية .

وأخيراً ، وبعد كل ذلك ، ماهذان الكيانان الغامضان المكان والزمان ؟ صحيح أننا نميل عادة لاعتبارهما شيئين طبيعيين مبررين ونتصور المكان مستمراً ودقيقاً حتى ليمكن أن نحدد فيه نقطة أو شيئاً ليس له امتداد ، وإنما له وضع ، ويمكن متابعته خلال الزمن ، إلا أن هذا كله وإن كان سلماً لاغبار عليه من الناحية التجريدية حتى ليبدو كأن ضرورته مطلقة قطعية ، ولكن ألن نكتشف فيه ما يثير الشكوك ؟ إذ كيف نحاول أن نحدد موضعاً كهذا غير متجسد أبداً في المكان الفيزيائي الحقيقي ، دون أن يتمثل لنا بالصورة العقلية التي نكونها عن المكان ؟ ما هي تلك الأداة الأصغر والأدق التي يمكن أن تفيدنا في تحديد وضع هذه النقطة ؟ قطعاً إنها ليست إصبعنا ، فهذا الأخير قد يكفي للدلالة على منزل أو حصى أو حتى على ما هو أصغر ، وإن يكن بصعوبة ، كحبة رمل معينة ، أما للدلالة على نقطة فالاصبع أضخم من أن يفيدنا بشيء .

إذاً ما قولنا برأس الإبرة ؟ إنه في الحقيقة أفضل ، ولكنه مازال بعيداً عن تحقيق غرضنا كاملا . لأننا لو فحصنا رأس الإبرة تحت المجهر لبدا لنا السبب واضحاً . إذ سيبدو عندئذ أشبه بمنظر متآكل معوج ، مشوه ، لانفع فيه . إذاً ما الوسيلة ؟ ليس أمامنا إلا أن نجرب مؤشرات أصغر فأصغر ، وأدق فأدق . ولكن هذه المحاولات لايمكن أن تستمر إلى الأبد ، ولابد أن تصل إلى شيء . إلا أن هذا الشيء النهائي سيظل يفلت منا ، لأننا سنصل في النهاية إلى الإلكترونات الفردية أو إلى النوى أو الفوتونات . ولايمكن أن نمضي إلى أبعد من ذلك كما يقول العلم في الوقت الراهن . إذاً ما الذي آلت إليه فكرتنا عن تحديد موضع نقطي ؟ ألم تختف إن صح التعبير وسط صخب الأونديكولات ؟ حقاً أننا أكدنا أن بمقدورنا معرفة وضع الأونديكول الصحيح بشرط أن

نضحي نهائياً بمعرفتنا بحركته . ولكن حتى في هذه الناحية ، توجد أسباب نظرية مرتبطة بتجربة كومبتون تعمل على الحد من دقة تعيين الموضع . وحتى لو فرضنا أن الموضع قد عرف بدقة مطلقة ، فهل نكون قد حصلنا عندئذ على نقطة مماثلة للصورة التي كوناها عنها ؟ كلا أبداً ، لأن النقطة لها موقع دائم ، بينما هذه النقطة التي حددناها زائلة . فكل ما نحدده هو أونديكول مجرد لانقطة مجردة . فسواء اعتبرنا الإلكترون أونديوكولاً أم جسيماً تتقاذفه الفوتونات تحت عينية مجهر هيزنبرغ ، فإننا في الحالين سنصل إلى أن فكرة موضع فيزيائي محدد ليست في يدنا ، بل مازالت تفلت منا حتى الآن ولم نعثر على الموضع على الرغم من أننا بلغنا أقصى ما تستطيعه الدقة النظرية الراهنة ، حتى ليبدو أننا ذهبنا إلى أبعد مما كنا عليه وقت انطلقنا والأمل في قلوبنا . فالمكان لايبدو بالبساطة التي كانت تصورها لنا سذاجتنا .

ويمكن أن نشبه هذا الموقف بموقف من يحاول إظهار بعض التفاصيل في صورة صحفية ، غير أن هذه التفاصيل اللعينة تأبى الظهور على الرغم من تفحصها بكل عناية . لذلك قد يتزود من ضيقه بعدسة يوجهها على الصورة ، لكن أمله يخيب ويصبح في وضع أسوأ مما كان عليه منذ قليل . فما كان يبدو عيناً أصبح خليطاً غير مفهوم من النقاط البيضاء والسوداء . والأمر بكل بساطة ، أن التفاصيل التي تخيلها ، لم يكن لها وجود ، ومع ذلك تبدو الصورة من بعيد سليمة لاعيب فيها .

هذه الظاهرة نفسها ، ربما كانت هي ما يحدث في وضعنا مع المكان ، وكذلك مع الزمان . إذ تدلنا غريزتنا أن فيهما تفاصيل لاحصر لها . ولكن ما أن نستخدم أدق تقنيات الملاحظة والقياس لتفحصهما حتى نكتشف أن هذه التفاصيل التي تخيلناها قد تلاشت . فالمكان والزمان ليسا كيانين أوليين في بناء العالم ، وإنما الجسيمات الأولية للمادة والطاقة هي هذه الكيانات الأساسية . وبدونهما لم يكن بمقدورنا أن نتخيل الصورة التي نكونها عن مكان وزمان مستمرين لاعيوب فيهما . وتلك الإلكترونات ، وكذلك سائر الجسيمات الأخرى الأساسية ، لاتوجد في المكان والزمان ، بل إن المكان والزمان هما اللذان يوجدان تبعاً لوجودها . إن هذه الجسيمات ــ أو الأونديكولات كما يجب أن نعتبرها إذا أردنا أن نستعمل في وصفها تصوراتنا الإنسانية الطابع وغير السليمة

للمكان والزمان كما تزينهما لنا مخيلتنا ــ هذه الجسيمات الأساسية تسبق مفهوم المكان والزمان وتستعلي عليهما . وهي أعمق منهما وأكثر تأصلاً وأساسية ، وأسبق في ترتيب الأوليات ، ومنها نبدأ ببناء مفهومي المكان والزمان ، فهي تشبه إلى حد ما النقاط والبقع التي تبدو في الظاهر عرضية ، ولكنها في الحقيقة هي التي توهمنا بأنها صورة صحفية بديعة خالية من العيوب . أو تشبه هذه الجسيمات إلى حد ما الصور التي تمثل أوضاعاً ساكنة ، ولكنها عند تعاقبها أمامنا بسرعة معينة عند إسقاطها على شاشة سينمائية ، توهمنا بأنها صورة حركة منتظمة مستمرة(١) .

ولربما كان هذا ما تسعى نظرية الكم أن تقوله لنا ، وما هو السبب في مظهرها الغريب غير المعقول ، إنه باختصار ، إذا لم يكن المكان والزمان هما المواد الأولية في بناء الكون ، وإنما هما مجرد أثرين وسطيين إحصائيين لعدد هائل من الكيانات الأساسية الأعمق منهما ، فلن يبدو غريباً بعد الآن أن تبدي هذه الكيانات خواص غير مناسبة تماماً لهما كالموجة أو الجسيم . وعلى كل حال ، ربما يوجد في مفارقات فيزياء الكم منطق داخلي .

إن هذه الفكرة ــ ونعني بها فكرة الآثار الوسطية الإحصائية التي لاتصح على فرد معزول ــ ليست جديدة على العلم . فدرجة الحرارة مثلاً ، وإن كانت تبدو شيئاً حقيقياً واضحاً نقرؤه على ميزان حرارة عادي ، إلا أنها ليست سوى أثر إحصائي ينجم عن حركات الجزيئات الفوضوية . ومع ذلك لانبدي أي انزعاج من هذه الحقيقة ، وكذلك ضغط الهواء في عجلات السيارة ، فهو ليس سوى أثر إحصائي ناجم عن الصدمات التي يتلقاها سطح العجلة الداخلي من ذرات الهواء التي لاتعرف الفناء ــ أو عفواً ــ التي لاتكل ولاتتعب (والتي يتجاوز عددها مليارات المليارات ..) . بينما لايملك الجزيء المعزول ضغطاً أو حرارة بالمعنى المألوف . لأن الحرارة والضغط العاديين لايظهران إلا عند وجود أعداد كبيرة . وإذا حاولنا دراستهما عن كثب في حالة جزيء واحد

---

(١) ألا يذكرنا هذا بنظرية الأوتار الفائقة الحديثة ، فكأن الكاتب يريد أن يستشف المستقبل في هذه التصورات راجع مجلة « العلوم » عدد يونيو/حزيران ١٩٩٠ . ولكن يبدو أن الإنسان لايستغني عن المكان والزمان (المترجم) .

بمفرده ، فإنهما يغيبان ، بكل بساطة ، عن نظرنا . وإليكم مثالاً آخر : خذوا أيضاً جريان ماء مستمر داخل أنبوب مثلاً ، إن هذا الجريان المتصل ليس سوى خيال أو وهم تتهيأ لنا رؤيته نتيجة لحركات عدد هائل من جزيئات الماء .

وهكذا ، فإنه لاشيء يمنع من أن يكون الوضع بالنسبة للمكان والزمان مماثلاً لما هو عليه في هذه الأمثلة . ولكن تخيُّله عندئذ أشد صعوبة ، حتى ولو بطريقة تجريبية . (ولكن لنحاول أن نتخيل ذلك) . فكما أن جزيئات الماء المأخوذة فرادى ، تختفي منها صفاتها العادية من حرارة وضغط وسيولة ، وكما تخلو أيضاً أحرف الأبجدية المنفصلة المشتتة من كل شاعرية أو معنى ، كذلك جسيمات الكون الأساسية ، فهي لن يظل لها مظهر وجود في المكان والزمان إذا ما أخذت فرادى .. بل إن المكان والزمان اللذين يخيل إلينا وجودهما على شكل كيانين أوليين وأساسيين ، واللذين لانستطيع أن نتصور أي وجود خارجاً عنهما ، ليسا سوى نتيجة مزيفة يوحي لنا بها هذا العدد الهائل من الجسميات الأولية . والآن لنرَ كيف تنتظم الأمور كلها مع هذا الافتراض . إن المفارقات الكمومية ، سيبدو أننا نحن الذين صنعناها ، لأننا حاولناأن نتتبع حركات جسيمات معزولة في المكان والزمان . في حين أن هذه الجسيمات ، نظراً لكونها معزولة ، فليس لها وجود ، لافي مكان ولافي زمان ، بل إن وجود المكان والزمان نابع من وجودها هي . كما أن الجسيم المعزول لايمكن أن يوجد في آن واحد في موضعين ، لأنه أصلاً ليس في مكان . فمثلاً هل نجد مايدهش في أن توجد فكرة مافي مكانين مختلفين ؟ طبعاً لا ، لأن الفكرة ، إذا نظرنا إليها على أنها شيء خارج عن دماغنا ، ليس لها وضع أو مكان . ولو أردنا ، لسبب ما ، أن نحدد لها وضعاً بطريقة افتراضية ، لتوقعنا لها أن تتعدى حدود المكان والزمان المألوفة . والسبب الوحيد في أننا نرفض مثل هذا الرأي في حالة الجسيمات الفردية ، هو أننا لانتخلى عن اعتبار المادة موجودة في مكان وزمان . ولكن ما أن نتخلى عن هذا الاعتبار ، حتى تزول جميع المفارقات ، وتتضح فوراً رسالة الكم ، وهي أن المكان والزمان ليسا كيانين أوليين .

قد يقول أحدكم ، ولكن هذا مجرد تأمل ! هذا صحيح ، ولكن ما من نظرية إلا وتنبثق من التأمل . وإذا لم نجد أحداً بعد قد أدخل في بنية ميكانيك الكم

الرياضية مثل تلك المتانة والقوة ، فلربما كان مرد ذلك إلى الصعوبة الهائلة في مسائلها التقنية والشعورية . ولكن علماء الكم ، يزداد لديهم طيلة انتظارهم ، إحساس بوجود ما يشدهم نحو تأمل من هذا القبيل . إذ يأملون منه حل كثير من مسائلهم المعلقة . ولكن ما من أحد يعرف كيف يعالجه لكي يجد له التعبير الرياضي المناسب . هذا من جهة ، ومن جهة أخرى ، إذا ما اتضح أن شيئاً كهذه الكيانات المنفصلة هي التي تشكل فعلاً طبيعة المكان والزمان الحقيقية ، فستبدو نظرية النسبية عندئذ ونظرية الكم خصمين لاسبيل لتصالحهما ما دامتا على طريقة عرضهما الراهنة . لأن بقاء النسبية على حالها الآن ، نظرية من نظريات الحقل، معناه أنها ستعتبر المكان والزمان حتماً كيانين أوليين، وأنهما هما الأساس . في حين أن نظرية الكم ، على الرغم من عجزها التقني الراهن عن التخلي عن إرهاب المكان والزمان ، فإنها تعارض بشدة هذا التصور . على أن هناك جانباً من الحقيقة في نظرية النسبية ، وجانباً من الحقيقة في نظرية الكم ، ولايمكن لإحداهما أن تزيح الأخرى نهائياً ، بل على العكس ، فأينما تلتقي النظريتان ، توجد المتانة والحيوية . لذلك نشاهد الآن محاولات لإجراء عملية تهجين قد تؤدي يوماً ما إلى نظرية جديدة تتمتع بكل المزايا الحسنة التي سترثها عن هذين الأبوين الشهيرين ، واللذين سترث عنهما غناهما ، لتنمو بعدئذ باستمرار إلى أن تعتلي عرش مملكتيهما المنفصلتين تحت لواء قانون واحد . أما ما الذي سيدوم في هذه النظرية من أفكارنا الراهنة ، فهذا ما لايعرفه أحد . فلقد رأينا فيما مضى الأمواج والجسيمات ، والمكان والزمان ، والسببية ، وكلها ملغومة من الداخل ، فلنسرع إذاً بإسدال الستائر خوفاًمن أن يحدث شيء جديد ، خطير فعلاً (وعندئذ لن نستطيع أن نضع نهاية لقصتنا) .

القسم الثاني

رحلات جديدة إلى عالم الكم

تأليف
ميشيل باتي

١ ــ ملاحظات مرعبة دونها غواص في عالم الصغائر

لايسعنا ونحن مقبلون على متابعة قصة الكم التي عشنا معها حتى الآن ، إلا أن نفكر بمفاجآت السفر إلى هذه البلاد المجهولة وبالمعلومات المتواردة باطراد عن غرائبها وأعاجيبها . فمشهدها الغريب الذي يظهر أمامنا ، لم نألف لمرآه ، حتى الآن ، أي شيء ، لافي أساليب تفكيرنا ولافي طريقة تعرضنا لأمور العالم الفيزيائي أو ظواهره . ففيها تحققنا بالفعل أن في مجال الكم شيئاً يخرج بنوعيته عن كل مألوف ، ذلك أن هذا الاسم « كم » يشير إلى شيء لاتطاله حواسنا (وبالتالي تجربتنا اليومية المباشرة) بأي شكل من الأشكال . في حين أن أكثر مفاهيم الفيزياء تشذيباً وتجريداً كانت ، حتى الآن ، لاتخلو من صلة مهما كانت مع ما يمكن أن يخضع للتجربة المباشرة ــ أو أنها كانت ، على الأقل ، تبدو هكذا إذا نظرنا إليها من وجهة تاريخية وعملية . فالتسارع مثلاً ، الذي قد يكون من أوائل التعابير المجردة فعلاً التي اضطر غاليليه لاستعمالها ، ليس سوى تغير السرعة الذي يحسه بجسده يومياً كل فارس يبدأ حصانه بالجري ، أو كل راكب دراجة يضغط على المكابح . وكذلك الجاذبية ، فهي كما نص عليها نيوتن قوة فيزيائية بين جسيمين لاشيء يربطهما في الظاهر ، لذلك رأى الديكارتيون فيها رجعة إلى الصفات السحرية التي شاعت في العصر الوسيط . ولكنها على الرغم من كل ذلك ، ومن أن نيوتن نفسه لم يرَ فيها كياناً فيزيائياً ، بل رياضياً ، أو نوعاً من الفيض الإلهي الذي ينتشر آنياً في الفضاء ، إلا أن الجاذبية ترتبط بحوادث تجري كل يوم ، كسقوط ثمرة ناضجة أو حركة القمر حول الأرض . وهناك أيضاً درجة الحرارة ، فهي مفهوم ليس مباشراً ولاواضحاً .. والدليل على ذلك ، المجهود الكبير الذي بذل لفصله عن مفهوم كمية الحرارة . إلا أن حواسنا تتمثله بيسر ، حتى ليمكننا أن نتخيل بسهولة ردود أفعالنا في الظروف التي تذكرنا بها تعابير من

قبيل : خمس وثلاثون درجة في الظل ، (التي تذكرنا بنسمة هواء في الصيف أو على الشاطئ أو في منطقة مدارية) ، أو صفر درجة (التي تذكرنا بتجمد الماء) ، أو بمئة درجة (بغليان الماء في الشروط النظامية) . أو لنأخذ فكرة الكمون التي قال عنها فيزيائيون ، حتى من القرن الحالي ، مثل بول لانجوفان ، إنها مفهوم صعب التصور . إنها اليوم مفهوم يألفه كل إنسان ، حتى أن التعبير فرق الكمون يشكل جزءاً من متاع كل مسافر ، فما أن يصل إلى الفندق حتى يدير زر آلة الحلاقة إلى الفولتاج المناسب . ولاتشذ عن ذلك الأنطروبية فهي على الرغم من كونها غير واضحة إطلاقاً ، إلا اننا نجد تفسيراً مباشراً لها في ظروف عديدة ، حيث تعني العودة إلى الفوضى والتشويش والتوازن في الوضع الأدنى . ولقد أصبحت دلالتها واضحة لدرجة أنها صارت هدفاً للعديد من الاستعارات المتنوعة ، وحتى المضحكة أحياناً . فبعد استخدامها في مواضيع تتناول أموراً كيفية محضة وغير محددة ـــ على الرغم مما يرد فيها من أرقام ، كمواضيع المسائل الاقتصادية ـــ فقد صار يبدو لنا أحياناً أنها تضفي على هذه المواضيع ، هالة من الجدية والشمول ؟

ثم هناك نظرية ، أو بالأحرى،نظريتا النسبية اللتان كانتا أيضاً من مبتكرات القرن العشرين إلى جانب نظرية الكم . ومع ذلك لم يطرأ شيء يذكر على أفكار هاتين النظريتين الأوليتين الأساسية (المكان أو الزمان أو الحقل أو الكتلة أو الطاقة) مثلما طرأ على أفكار الثانية (الكم) . فأفكار النسبية ـــ سواء أكانت بصيغتها الرياضية أم بغيرها ـــ هي أفكار مألوفة لدى الناس جميعاً ، بما في ذلك فكرة الحقل التي أدخلها أمبير وفرادي منذ زمن بعيد بصفتها فكرة أساسية حسنة الإعداد والتكوين الشكلي ، وهاهي تستخدم اليوم في أمور كثيرة . ومن منا لايذكر تلك الرسوم الجميلة التي تصنعها برادة الحديد حين تجسد خطوط القوة لمغناطيس : حتى لقد أغرت هذه الصورة المحللين النفسانيين وعلماء الاجتماع بأن يتحدثوا هم أيضاً عن حقول بشأن الميدان العلمي الخاص بكل منهم . وهذه الحقول ، لاشيء يربطها طبعاً بتلك التي تتعلق بالكهرطيسية أو بالنسبية . ولكن الشيء الملفت للنظر حقاً هو أن الصورة والتعبير قد استعيرا من الفيزياء . وهذا ، إن دلّ على شيء ، فإنما يدل على أن المحللين النفسانيين وعلماء الاجتماع الذين

يتحدثون إلى كل إنسان ، استعانوا بفكرة الحقل ، لأنه أصبح في نظرهم مثالاً توضيحياً أكثر من عادي ، وذلك لشدة ما مارسناه وخبرناه في تجربتنا وتعليمنا .

ويصح هذا القول أيضاً عن المكان والزمان ، على الرغم من كل الإهانات التي ارتكبها بحقهما ذلك الثائر الوقح أينشتين . إلا أن صاحبي الجلالة هذين ، اللذين نصبهما نيوتن كيانين مطلقين يحويان كل شيء ، وأحيطا مذ ذاك بقالب جامد من رصانة الأبدية ، حتى أن كانط Kant تجرأ على وضعهما في جملة مقولات الإدراك المحضة ، أصبحا يوماً ، وإذا مجرد كاتب في مكتب براءات الاختراع في بيرن ، يدعى ألبرت أينشتين ، يضعهما في محنة قاسية . حتى أنه شوهد وهو يهزهما بعنف كشجرتي نخيل تحت أعين أشهر مفكري العصر الغاضبة واستنكارهم . وكان من هؤلاء فيزيائيون وفلاسفة ، ومنهم بوانكاريه نفسه .

غير أن ذلك كله لم يخرج هذه العناصر الأساسية من إطار الحس . فحتى وإن لم يعد ثمة مكان وزمان مطلقين ، وأصبح كل منهما في مكانته الصحيحة ـــ إذ لاوجود لزمان مطلق ، بل نسبي ، ولاوجود لتزامن مطلق بين حدثين ، بل نسبي أيضاً ـــ ، وإذا كانت بنية المكان تابعة لكمية المادة أو كمية الطاقة الموجودة فيه ـــ وهذا ما تنادي به النسبية العامة ـــ ، وإذا لم تكن الكتلة والطاقة سوى وجهين لكمية واحدة مرتبطة ببنية المكان والزمان السابقة نفسها ، إلا أن المكان والزمان والدفع والطاقة كلها لازالت خاضعة لتجربتنا الحسية المباشرة . وهذه التجربة ، وإن كان من الضروري أن تكون تجربة راقية ممحصة بالنسبة لما هي عليه عادة عند ترجمتها إلى معطيات حدسية أولية ، إلا أننا نستطيع بتجارب يمكن أن نجريها كل يوم أن نتخيل بأن الإشارتين المتزامنتين بالنسبة إلى قطار يتحرك ، لن تبدو كذلك بالنسبة للرصيف . أو يمكن كذلك أن نتصور أن شعاع الضوء الذي يمر بجانب الشمس ، سيسير في خط منحن . فتجربة الحواس ، حتى بعد تمحيصها وتشذيبها ، تظل ، هي هي ، تجربة حواس .

أما فيزياء الكم فتبدو مختصة بميدان آخر يختلف بتجريده كلياً عن كل التجريد الذي لابد لمسناه في طبيعة الصياغة المجردة جداً التي توصلت إليها سابقاً

الفيزياء الكلاسيكية في نهاية القرن الماضي ، أو في طريقتها غير المباشرة مثلاً لمواجهة بعض المسائل (كما يشهد على ذلك ميكانيك هاميلتون أو كهرطيسية مكسويل ، أو كذلك ترموديناميك كلاوزيوس وكلفن وفون هيلمهولتز ، أو الميكانيك الإحصائي الذي أتى به بولتزمان وجيبس) . ولقد رأينا أي دور تلعبه هذه الفروع المختلفة في فيزياء الماضي في إعداد نظرية الكم . فهذه الفروع ، على كل حال ، كانت محاولات مجردة وغير مباشرة لدراسة الظواهر . وقد توصلت بعد سلسلة من المحاولات ، ومن التقدم السريع والانتكاس والتقلبات ، إلى إظهار سمة الميدان الكمومي في الذرات وفي النوى وفي الجسيمات عامة . ثم أمكن القيام في هذا الميدان الكمومي بعدد من التحققات المذهلة فعلاً ، إذ أظهرت عجز حواسنا وخيالنا عن الوصول مباشرة إلى الظواهر التي تحدث فيه . فمثلاً أي متبجح هذا الذي يجرؤ أن يدعي أنه رأى مدارات الإلكترونات حول نواة الذرة ؟ والأدهى ، أن الفيزيائيين يتحدثون اليوم عن الكواركات ، أي تلك الجسيمات الأدق التي تشكل نسيج العالم المادي . والحقيقة ، ما من أحد رآها أبداً . بل لن يراها أحد مطلقاً ، أو على الأقل ، طالما بقي الإنسان إنساناً ، وعيناه عينان . وإذا قال أحدهم إنه رآها ، فما ذلك إلا من قبيل توسيع معنى الرؤية إلى الرؤية القلبية . لقد تحققنا وجودها من الآثار غير المباشرة التي تناهت إلينا بالتتالي إلى أن بلغت حواسنا . وعندئذ وجدنا القدرة على أن نستنتج أن لامحالة أن هناك كواركات في الطبيعة .

ولايختلف الأمر مع الكواركات عما كان عليه قديماً مع الذرات ، مع فوارق بسيطة سنتحدث عنها بعد حين باختصار . وهذه المقارنة تكتسي أهمية خاصة من حيث أن الذرات أصبحت مألوفة لدينا بسبب قدم معرفتنا بها ، وكذلك بسبب وجودها الفعلي ، على الرغم من أنها مستترة في أغلب الأحيان في تركيب تقني ــ علمي يحيط بنا[1] . فحتى وإن لم نستطع رؤية هذا العالم المحتجب، عالم الكواركات ، إلا أننا نستطيع معرفته . أما كيف ذلك ؟ فبعملية لاتختلف اختلافاً كلياً عن تلك التي تمكننا بها من رؤية خلايا قشرة بصلة أو قطرة دم ، أو أميبيا مثلاً ، إذ يمكن أن نتخيل مجهراً فائق

---

(١) عند الانتقال من الذرات إلى الكواركات تتحول الأبعاد من 10^{-8} سم أي 1 أنغستروم ، إلى 10^{-16} سم أي 10^{-8} أنغستروم (إذاً تنقص أبعاد الكوارك عن أبعاد الذرة مئة مليون مرة) .

القدرة يستطيع أن يميز أدق التفاصيل في البنية المكانية للأجسام ذات البعد الصغير جداً . لذلك يلزمنا أن نستعمل في هذا المجهر،عوضاً عن الأشعة المضيئة ، إشعاعات أدق[1] ، ذلك أن المجهر الذي يستعمل الأشعة السينية ، يكشف بنية البلورات التي لاترى بالضوء العادي . (وهذا ما جعل المجاهر الإلكترونية تصبح اليوم بين التجهيزات المألوفة في المخابر لتساعد على فحص بنية المعادن ورؤية تشكلات الجزيئات العضوية العملاقة) . أما إذا أردنا التنقيب في أعماق أكثر ، فعلينا استخدام **الجسيمات الأولية** ، لأن طاقة اندفاع هذه الجسيمات مهما كانت قليلة ، فهي من الشدة بما يكفي مبدئياً للتنقيب بالدقة والعمق المطلوبين في نسيج المادة الأولية .

وهكذا إذاً ، نستطيع القول إن السفر إلى أقصى عمق في المادة أصبح ممكناً بعد الآن : فلنتخيل أن هناك « بارون منهاوزن »[2] حديث قد ركب فوق أحد البروتونات عند مدخل أحد المسرعات ، وأنه تمسك به باليدين والرجلين لكي يصمد في وجه الريح والعواصف . وبعدما أخذت حركته تتسارع شيئاً فشيئاً عند كل مرور في أنفاق التسريع ، راح يدور ويلف وكأنه مهر أرعن أرسل شعره يسبح مع الريح وهو منطلق يعدو داخل الحقول المغناطيسية. وفي الختام وعندما أتم ملايين الدولارات في بضع أجزاء الثانية، قذف به البروتون أخيراً إلى دريئة في بلاد المادة اللامتناهية في الصغر . وهنا ، لاأظنكم تعترضون ، إذ أليست تجربتنا هذه تجربة فكرية مثل غيرها ، وطبيعتها هي ، بما لايقبل الجدل ، فلسفية ؟ كل ما في الأمر أن الطاقة التي يمكن أن نبلغها الآن ، يمكن أن تجعلنا قادرين على تصور النفاذ إلى هذا العالم الغريب العجيب الذي حدثنا بانيش هوفمان عن جزء كبير من قصته ، والذي تغدو مغامرات « منهاوزن » عند السلطان ، أو مغامرات جلفر في بلاد الأقزام ، لا شيء بتاتاً أمام المفارقات العجيبة التي لايتصورها عقل والتي سيصادفها مفكرنا الكثيف الشعر في بلاد الذرات والجسيمات .

---

(١) لأن قدرة المجهر على التمييز بين التفاصيل تزداد كلما نقص طول موجة الإشعاع . فالأشعة السينية موجاتها أقصر من أشعة الضوء المرئي ، والأمواج المرافقة للجسيمات أمواجها أقصر حتى من الأشعة السينية (المترجم) .

(٢) بارون « منهاوزن » هو الذي ركب على قذيفة مدفع لتنطلق به إلى القمر في قصة جول فيرن (المترجم) .

ترى ، ألا يترتب على صاحبنا (كأي مسافر إلى بلاد غريبة) أن يخلع عنه عقليته القديمة لكي يفهم شيئاً عن البلاد التي سيزورها ؟ إن المدارس تختلف ، في هذا الأمر على الأقل . فعالم الأجناس المتحفظ لايتفق مع المغامر ، لأن هذا الأخير لايخشى أن ينفض عنه كل شيء لكي يتلاءم بشدة مع عادات الناس الذين سيدرسهم ؛ فهو يقرر أن المفاهيم القديمة غير أساسية . بينما يكره عالم الأجناس المتحفظ ، بصفته يدرس أحوال هذه الأقوام ، أن يتخلى عن عاداته كلها . لذلك يحتفظ ، خلافاً للمغامر ، ببعض العادات القديمة ، ولكنه يتظاهر بالتحلي ببعض العادات الجديدة ، فيتزيا بزي البلد الذي هو فيه ويتزين مثلهم .

وهنا تُطرح المسألة الأساسية التي دعوتها مسألة المسافر في غواصة أعماق الصغائر . لذلك دعونا نتخيل أن الرحيل على متن البروتون قد استبدلنا به الرحيل داخل كبسولة الأغوار ، وهي غواصة تستطيع استطلاع أعماق المحيط ، ولكن دون النزول طبعاً إلى أي غور أو محيط ، لأن الغواصة التي حجزنا فيها مكاناً لنا ، ستكون مخصصة لاستطلاع الأبعاد الصغيرة في المادة ، أي في عالم الصغائر . فلنتصور أن هذه الرحلة إلى عالم الصغائر قد سارت على النحو الذي تقلص فيه الرجل في إحدى قصص الخيال العلمي[1] ، حيث كان إدراك هذا الرجل للعالم يتبدل كلما نقص حجمه . فعندما أصبح طوله ٦٠ سم ، أحب قزمة مثله ، ثم عندما صار طوله سنتيمتراً واحداً اضطر للدخول في معركة مريرة مع عنكبوت بدت له هائلة الحجم ، فاستخدم للقتال معها دبوساً بدلاً من السيف .

وهنا نلاحظ ، كما لاحظ بطل ماتيسون ، أننا مهما بذلنا من جهود يائسة لفهم الأشياء التي وصلنا إليها في نهاية رحلتنا على أنها كالأشياء التي ألفناها ، وأن ما تبدل هو مجرد تبدل في المقياس ، هي جهود ضائعة لافائدة منها . ذلك أن الأشياء لن تبدو ، بدءاً من حد معين على الأقل ، مجرد محاكيات للتي كنا ألفناها . وهذا الحد هو

---

(١) القصة المعنية هي « الرجل الذي انكمش » للمؤلف ريتشارد ماتيسون Matheson . وقد شاعت هذه القصة جداً في أوروبة وأمريكة منذ سنوات (المترجم) .

عتبة الكم التي نحتاج لاجتيازها إلى جواز مرور وإلى كلمة السر اللذين لن نحصل عليهما من أول مرة إلا إذا أعفينا من بعض شروط الدخول . ولكن أي بلاد تفتح أمامنا ؟ إنها بلاد الأبعاد الصغيرة جداً ؟ هذا أكيد ، ولكنها أيضاً بلاد الأشياء القليلة العدد : فالجسم الفيزيائي الذي هو من مقياس جسمنا ، كان ، قبل مغادرتنا ، مكوناً من عدد « فلكي » من الذرات الصغيرة التي يعبر عنها تقريباً عدد أفوكادرو 6×10^{23} ، وهذا مثال عن أحد التوجيهات النادرة التي نُبِّهنا إليها عند مغادرتنا ، فالقطر مثلاً هو 10^{-8} (جزء من مئة مليون) للذرة ، و 10^{-21} (الأصغر من السابق بعشرة آلاف مرة) للنواة ، وأقل من ذلك أيضاً للجسيمات . وأخيراً ... وبعد العد العكسي للإقلاع ، تنطلق الآلة وتغوص في اتجاه أعماق الضآلة والندرة ، وهكذا إلى أن تصل إلى بلاد الكم . ولاحاجة بنا إلى القول إن قصتنا قد حيكت أصلاً لغرض معين إلى حد ما ، لأننا نفترض بأن المسافر لم يحس نتيجة تصغير المقاييس بأي تبديل جذري ، وأن فكره لم يعانِ من أي تعديل في طبيعته ، في حين أن حجرته نفسها ، لابد أن تأخذ ، كما يتراءى لنا ، وكما سنرى في الفصل المخصص للقياس ، جميع مظاهر السكن الأصلي في تلك البلاد ، أو على كل حال سنتباحث في هذا الأمر ، لأن **مشكلة** مسافرنا هي بالأساس علاقة هذه البلاد الجديدة بتلك الأداة ، التي — مع أنها أتت من عالم إحساساته وأشيائه الكبيرة — سيستخدمها لاستكشاف العالم الجديد ، أي وفقاً لبنية فكره الخاص وتكوينه المسبق (المهيأ للعالم الكبير الماكروي) .

إن ما سيكتشفه مسافرنا من نافذة مركبته هو عالم المادة الفائقة الصغر الذي كان يجهل عنه كل شيء وهو في بلده الأصلي . ومع ذلك سيجد أن بعض خواصه ليست غريبة كل الغرابة عن العالم الذي قدم منه . فهذا العالم الأخير ، كان قبل كل شيء ، له بحكم موقعه العلوي ، إطلالة عامة إن صح التعبير ، أو نظرة شمولية ، وله أيضاً فتحات تجري فيها اتصالات ومبادلات — ولكنها حقاً ذات طبيعة غريبة جداً — وهي تلك الإشعاعات الصادرة عن الذرات أو النوى التي نستدل عليها في عالمنا الكبير من مفعولاتها — كالآثار التي تتركها مثلاً على ألواح فوتوغرافية حساسة ، أو فقاعات في سائل ، أو وميض شاشات براقة . والحقيقة أننا لم نستطع الوصول إلى شيء من المعرفة عن

عالم الكم إلا بعد ترجمة رسائل من هذا القبيل . فمنذ ذلك الحين أخذنا نكتشف فتحات أخرى بين عالم الكم وبين عالمنا الكبير . منها مثلاً إشعاع اللازر والناقلية الفائقة . فهذه المكتشفات ، أكدت لنا أن عالم الكم ليس غريباً عن عالمنا إلى هذا الحد ، وأن آثاره تتجلى عندنا دونما حاجة للقيام برحلة إلى تخوم الذرة نفسها . فعالمنا الخاص إذاً ـــ إن تجرأت على القول ـــ هو العالم المعني بالكم (وأرجو ألا يساء فهمي ، فأنا أقصد أن الكم له غزوات على عالمنا الكبير الواسع ، وأن عالمه ليس غريباً عنا كل الغرابة ، كل ما في الأمر أنه عالم داخلي) . لذلك صار لدينا مبرر جديد يدفعنا لأن ننظر من النافذة ونحاول فهم طبيعة هذا العالم الداخلي .

ولقد وصفت لنا « قصة الكم الغريبة » كل مفاجآت السفر إلى هذا العالم ، عالم الكم ، حيث رأينا كيف أدى الانقطاع (عدم الاستمرار) في الظواهر الذرية ، وفي ظواهر التأثير المتبادل بين المادة وبين الإشعاع ، وكذلك في الإشعاع نفسه ، إلى إعادة النظر في بعض المفاهيم التي كان يُظن أنها أصبحت واضحة تماماً في الفيزياء الكلاسيكية ، وأن مكانتها ستظل هي هي في كل مجال . وكان أول هذه المفاهيم التي تعرضت للظنون هو تمثيل الحوادث في المكان ، الذي بدأ مع أعمال بوهر الأولى . فنموذج ذرة بوهر ، كان يصف الانتقالات الذرية مكتفياً بتقرير ما كان موجوداً قبل الانتقال ، وما كان موجوداً بعده . وكان يعتمد في ذلك على **الحالات المشاهدة** Les états observables ، أما في الحقيقة ، فلم يشاهد لا الإصدار ولا الامتصاص نفسيهما . وقد أدى السير في هذا الاتجاه بهيزنبرغ إلى إبراز الدور الخاص « للحالات المشاهدة » . مما قاده بالتالي إلى ميكانيك المصفوفات . ثم عندما أظهر طبيعة ميكانيك الكم غير الكلاسيكية ، انتقد مفهوم المسار ، بأن أعلن عن علاقات الارتياب . إذ نتجت هذه العلاقات من الخاصة الأساسية الأولى في الميكانيك الجديد ، ونعني بها الخاصة التي يعبر عنها في الشكلية الرياضية بـ « لاتبادلية » المؤثرات التي اختيرت لتمثيل عدم تواؤم المتغيرات non – compatibilité des variables . وقد كانت هذه الخاصة موضع دراسة مطوّلة في الفصول السابقة (في القسم الأول من الكتاب) . ولاعجب ، فاللاتبادلية هي فعلاً مفتاح اللغز كله الذي يفضي امتلاكه إلى أسرار الميدان الكمومي . والمسافر الذي تزوّد به

يصبح قادراً على متابعة رحلته بكل أمان في بلاد الكم ، لأن هذه الرحلة لم تنته بعد ، فما قيل حتى الآن لم يتحدث بشكل رئيسي إلا عن وضع الدعائم الأولى لميكانيك الكم وعن مبادئه الأساسية ونتائجها وشرحها . ولكن السؤال هنا : هل تظل بنية المشهد على حالها عندما يتقدم مسافرنا متعمقاً في بلاد الكم ؟ أو على الأقل ، هل يفضي المفتاح (الذي أصبح في يديه) إلى كل الميادين التي يمكن أن يتصورها العقل دون تحديد ، أي كل الميادين التي يمكن إدراكها أو النفاذ إليها نتيجة دفعة قوتها كافية ؟ أم تظل هناك ساحات سرية ، وجبال يُمنع ارتيادها ؟ أو بمعنى آخر ، هل يظل ميكانيك الكم صالحاً للدراسة والتعمق فيما هو أبعد من الذرة ــ التي خصص لها أصلاً عند بدايته ــ وأبعد من النواة والجسيمات ؟ فهذه النقطة لم تكن واضحة من قبل . ولقد خشي الرحالون أكثر من مرة من الغوص بكل أدواتهم وأسلحتهم في هذه الأصقاع المجهولة النائية ، إلا أن ما ظهر بعد حين ، هو أن هذا المفتاح عام ، لأنه يفتح جميع الأقفال التي تظهر أمام الرحالين بالتتالي ، حتى لكأنه لمسة سحرية . كما أن هذه الأقفال تفتح أبواباً تفضي إلى مناطق أبعد فأبعد . ومازال هذا الاستكشاف لأعمال المادة مستمراً إلى اليوم ، وفي كل يوم يكشف لنا عن مشهد متشابك من الجسيمات والحقول ، وعن تشكلات مذهلة من التناظرات التامة والمكسورة التي تعطي ، كالمرايا المرتبة بحذق ، صورة القوانين التي تحكم هذا العالم العميق . وعند تخوم هذه الأغوار الغريبة ، تفتح لنا طرق نظرية الكم ، بحسب صياغتها الراهنة التي أَخَذَت شكل **نظرية كمومية لحقول التأثير المتبادل** ، نوافذ تطل على أكثر مما كنا نتوقع . بالفعل ، ألم يتراءى لنا في آفاق الماضي السحيق ، ضياء الكون العظيم بمجمله كما كان يرتسم خطوة فخطوة في اللحظات الأولى من ولادته[1] ؟ ولكننا سنؤجل الحديث عن هذه المآثر والفتوحات إلى الفصل الأخير ، فهو مخصص لوصف هذه المشاهد ، ولما تحقق من اتقان نوعي متميز في الوسائل المفهومية (المجردة) التي تساعد على استعمال مفتاح الكم للوصول إلى هذه المشاهد .

ولكن ، إذا كانت هذه المرحلة اللاحقة من رحلة غواصنا ــ وهي

(١) يقصد نظرية نشوء الكون وكيف استدل عليها من « الخلفية الإشعاعية » التي اكتشفت في أواسط الستينيات من هذا القرن (المترجم) .

أصـــلاً جزء من التـاريخ المعـاصر ــ قد عدلت أداة الكشف وعقدتها ، ويسـرت له معرفة « أشيـاء » عالم الكـم ، وميزت بين كيـاناته التي تعمر هذه الأغوار ، وفصـلتها وعددتها ، وردتها أخيراً إلى بضع كيانات عميقة ، فإن معرفته عن عالم الكم وعن طبيعة مبدئه ، لم تتبدل على الرغم من ذلك تبدلاً أساسياً . فالخواطر المخيفة جداً ، أخذت تسيطر عليه بحق (ولاتزال) بشكل مروع منذ أن بدأ رحلته الثانية[1] مباشرة ، أي منذ بدأ تلك الرحلة التي شهدت حوالي العام ١٩٣٠ تشييد ميكانيك الكم بشكل نظرية تامة الإعداد . لأن رحالة كهذا ، اعتاد الحتمية والسببية الكلاسيكية ، وألف الفصل الذي يميز بين الأشياء التي ندركها على أنها أشياء لها فرديتها ، لابد أن يقف شعر رأسه هلعاً عند مراقبة مايجري أمام عينيه . فالمشهد الذي يراه من مكانه الصغير ، سيبدو له غريباً جداً ، لأن ما يراه ليس سوى أشكال غائمة ضبابية ليس لها خواص واضحة محددة . بل كل شيء يسـير بالاحتمالات . وتلك « الأشياء » التي ليست بأشياء ــ فلا هي بأمواج ولا هي بجسيمات ، ولا هي بنساء ولا هي بسمكات ــ لا تتبع مسارات بالمعنى الدقيق : إن هذه الأبعاد الصغيرة جداً تتحرك بحركات تزوغ من البصر ، أو حركات عشوائية يستحيل تمييز بعضها من بعض أو فصلها . تُرى ، هل هذا العالم هو عالم العماء القطعي النهائي الذي لا أمل في وصفـه أبداً ، أي عالم المصـادفة التي لاتقف عند حد ، والفوضى التي لاتعرف الاستقرار ؟ لاشك أننا سعداء الحظ ، **لأن عالمنا الخاص الذي تؤمن قوانين الميكانيك نظام سيره** ، يحميه من هذه الفوضوية حارس لايعرف التساهل والإذعان ، إنه هو ، ودائماً هو ، الكـم h . ذلك أننـا بعد أن نكبر ونتحول بأبصـارنا نحو أكوام أكثر معقوليـة ، ومؤلفـة من عدد كبير من الأجسـام ، تصبح انطباعاتنا الغائمة عندئذ أكثر وضوحاً وتعيد لمقولة المكان حقوقها ، ونعود نحن بذلك إلى عالم يأخذ فيه كل شيء مظهر الجسم والشكل ، حيث الموجة موجة ، والجسيم جسيم ، أي عالمنا ، أو عالم الفيزياء الكلاسيكية أولاً وأخيراً . ولكي ننتقل من عالم إلى آخر ، من العماء إلى الوضوح ، هناك دليل موثوق ، إنه مبدأ التقابل [2] . غير أن ما يزعجنا في هذا الدليل ، هو أنه لايؤدي من

---

(١) الأولى كانت خاصة بنظرية الكم القديمة التي امتدت حتى عام ١٩٢٣ .

(٢) انظر ص : ٧٧ ، ٧٨ ، ١٠٢ ، ١٢٠ ، ١٢١ .

الزيارات الممكنة إلا تلك التي في اتجاه معين . فهو بلا شك يربط الضبابي غير الواضح بـالصريح المعـروف أحسـن معرفة ، كما يؤمن العبور وإغلاق الأبواب في وجه من يريد العودة . فوظيفته تطمئننا . إلا أننا إذا حاولنا استكشاف عالم الكم بأنواره (أي بأنوار مبدأ التقـابل) وحدها ، فإننـا لن نستفيد منه كثيراً ، لأن لغته بدائية ، والأبواب التي لايعرف طريقة فتحها ، يوصدها تماماً أمامنا . على أن الاعتراف بالفضل واجب ، فهو حين أعطى ما لديه ، ساعد المسافرين في بدايات محاولاتهم بأن كان لهم مرجعاً ، كما أتاح لهم أن يتعرفوا على الأشكال في الظلال الباهتة . ولكن مبدأ التقابل لايمكن أن يكون من حيث المبدأ والتعريف ، كافياً لإعطائنا فكرة مضبوطة عن الأشياء ، هذا على فرض أن هناك فكرة مضبوطة .

ذلك أننـا كما تـرى نعـود إلى السـؤال الملـح : ترى هـل توجد حقـاً وسيلة تمكّن المسافر من أن يرى بوضوح ، ومن أن يحكم « نظر » إدراكه ، ومن أن يقوم بعملية مطابقة إن صح التعبير (أي كما تفعل العين) ، على الأشياء التي نخمن أنها هناك في الجهـة الأخرى من الواجهـة ؟ إن الرؤية الغائمة لأشكال المسـارات ، إنما هي نتيجة لمفعـول عـلاقات هيزنبرغ ، وهي تنتج عن توزع الاحتمالات الذي حل محل التحديد الوحيد للمسار . والشيء ، أو « الواقع » الذي نتحدث عنه ، يصفه تابع الموجة . فهذا الأخير هو الذي يعين بالتحديد تلك الاحتمالات التي يبدو أنها تُحرِّم كل مطلب لليقين . ولذلك يجد المرء نفسـه هنا أمام عدد من المذاهب الممكنة . أولها ـــ وهو المباشر ، كما يبدو ، لأن التجربة تهدي إليـه فوراً ـــ هو أن يقول إنه يستحيل من حيث المبدأ على باحث الكم أن يتوصلَ إلى رؤية واضحة . وهذا في الحقيقة موقف أولئك الذين وقفوا مع بوهر وهيزنبرغ وأعضاء مدرسة كوبنهاغن . وهي المدرسة التي كانت مكونة من الأوائل الذين وصلوا إلى الكم . فهؤلاء يحاجّون بأنه لامناص من تمثيل العالم الكمومي بعبارات المفاهيم الكلاسيكية . وعلى هذا الأساس ، تقف المعرفة عند حد لايمكن تجاوزه . فهذه الكـائنـات الواقعـة خلف النـافذة ، لايمكن أبداً التفكير فيها بذاتها ، وإنما دائماً بحسب حاجات المشاهد ورغباته الطيبة . فهذا ، أي المشاهد ، إذا قدم لهذه الأشياء حلقة لتقفز من داخلها كحبات الحمص المكسيكي ، اي كجسيمات ، فإنها تؤدي المهمة بليونة تفقد

معها كل فكرة في أن تكون موجة . وإذا قدم لها شبكة انعراج ، أو حلقتين صغيرتين جداً .. إحداهما فوق الأخرى ، (تدعيان ثقبي يونغ) ، فإن هذه الأشياء تلعب كما طلب منها لعبة التداخل ـــ أي تتصرف كأمواج ـــ ناسية بذلك أنه أمكن اعتبارها منذ لحظة جسيمات [1] فإذا كان هذا شأنها ، فإن ما يراه المشاهد ليس مستقلاً عنه أبداً ، بمعنى أن المعرفة الكمومية تعتمد على الثنائية التي لاتنفصل أبداً ، والمكونة من المشاهِد والمشاهَد (الذات والموضوع) . فالمشاهِد إذاً جزء لايتجزأ من تعريف المشاهَد . كما لم يعد ثمة موضوع بالمعنى الصحيح . والمشكلة الوحيدة التي تظل قائمة ، وهي مشكلة القياس ، تصبح محلولة آلياً باقتراح بسيط كما سنرى فيما بعد .

ولكي يتجنب بوهر إمكانية تأويل هذا الوضع على أنه تقييد يحد من معرفتنا العقلية للظواهر الفيزيائية في ميدان الكم ، لذلك لجأ إلى تطوير فكرته التكاملية التي تقول إن ما يفتقر إليه الإعلام المستقى من وجهة نظر معينة (الوجهة الجسيمية مثلاً ، أو وجهة الموضع في المكان) ، نعود فنعثر عليه ، أو نعوضه ، عندما نتبنى وجهة النظر المكملة (الوجهة التموجية ، أو الدفع ، عطفاً على المثال السابق) . إن وجهتي النظر هاتين متنافيتان ، أو إحداهما تستبعد الأخرى ، ولكن بالنظر إليهما معاً ، تتكون لدينا رؤية كاملة لمجمل الظاهرة .

ثم إن هذا الرأي ، يعطي دوراً رئيسياً ومميزاً لمبدأ التقابل . بمعنى أن هذا المبدأ أصبح أكثر من قاعدة انتقال إلى النهايات ، إنه مبدأ هورستيكي[2] ، وهو الدليل ، أو الأساس ذاته لكل نظرة ممكنة (أي بخلاف ما قلنا عنه منذ قليل بطريقة تهجمية ، ولكن رأينا تبريره مع ذلك في القسم الأول) .

ترى أحقاً لايوجد بديل لهذا الرأي ؟.. لنأخذ هذا مثلاً : ألا يمكن أن نقول إن المسافر يستطيع أن يصنع أو يستعير من خلف نافذته نظارات ملائمة

(١) راجع القسم الأول ص ١٧٦ حتى آخر الفصل .

(٢) هذه الكلمة مشتقة من كلمة « أوريكا » ، أي وجدتها ، التي يروي أن أرخميدس أطلقها عندما اكتشف فجأة حلاً لمشكلته الشهيرة ، وهي تعني هنا أسلوب الكشف والإلهام الذي يفتح مغاليق الأمور بعد طول تأمل ومعاناة (المترجم) .

يمكن أن تؤمن له المطابقة لكي ينظر[1] إلى الأشكال ـــ التي كانت منذ حين تبدو غامضة ـــ والتي ترتاد هذه النواحي البحرية أو هذه الأعماق الفيروزية في قاع البحر . فإذا أنت قلت بإمكان هذا الأمر ، فأنت تقر مبدئياً بدعوى المذهب **الواقعي** الذي يحاجج به أينشتين ، والذي عبر عنه بقوله « ثمة شيء ما ، هو بمثابة الحالة الواقعية لأي منظومة فيزيائية . وهذا الشيء ، موجود بصورة موضوعية وبشكل مستقل عن كل ملاحظة وقياس ، بل يمكن أن يوصف بوسائل التعبير الفيزيائية » . فإذا صح ذلك ، فلابد عندئذ أن يكون ماتحدثنا عنه : الاضطراب وعدم الاستقرار وعدم الدقة والفوضى كلها ليست سوى أشياء ظاهرية نشأت عن عيب في نظرنا إلى الأشياء . إن هذا البديل ، الذي سيحل محل اعتبارات بوهر وجماعته ، يمكن تصوره بطريقتين :

الأولى ، التي تبدو طبيعية أكثر ، هي أن غموض الرؤية الذي سبق الحديث عنه ، ينشأ عن عجز في حدة بصرنا، أو ـــ عفواً ـــ في بصيرتنا وتفكيرنا النظري ، وأنه لابد أن تكون هناك إمكانية لاكتشاف وسائل توفق بين الأشياء الجديدة والرؤية القديمة . أو بمعنى آخر ، يمكن أن نعيد بشكل ما للعالم الكمومي السببية القديمة وحتمية النتيجة الوحيدة غير الاحتمالية التي كانت معروفة سابقاً ، وكذلك المسارات التقليدية وتوضعها . ولن يحتاج الأمر لذلك أكثر من أن نكشف في الأشياء الكمومية ميزة كانت خافية عنا حتى الآن ، ولكن ما إن يتم كشفها حتى نرى فجأة بوضوح ما كان خافياً علينا . إن وجهة النظر هذه ، يمكن أن ندعوها « الواقعية الكلاسيكية » ، وذلك في مقابل وجهة النظر السابقة (أي وجهة نظر بوهر التي تُنسب « للإجرائية »أو « الوضعية ») وتعتبر هذه الوجهة الواقعية الكلاسيكية ، في الحقيقة ، أن من الممكن الخلاص من النوعية الكمومية ، وأن هذه النوعية ليست سوى تعبير عن جهلنا . أي مثلها في ذلك مثل جميع قوانين المصادفة التي تصاحبها . فمن المناسب أن نوازن بين وجهة النظر هذه ، وبين وجهة نظر بوهر (المعارضة لها) . وسيكون هذا موضوع فصلنا القادم . (ولكن لابأس بكلمة حول هذا الأمر لتشويق القارئ ، فنعلن مقدماً عن مآثر وكشوف

(١) وذلك على غرار ما تؤمن النظارة المطابقة في العين لرؤية الأشياء على حقيقتها (المترجم) .

ستعرض عليه) . لذلك نقول : إذا لم تكن المصادفة سوى قياس لجهلنا ، ولم يكن استعمال الاحتمالات والإحصاءات سوى حساب لمتوسط حول ظواهر خفية مجهولة عندنا ، وإذا كانت علاقات الارتياب يعوض عنها التحديد المضبوط لبعض الخواص التي لازالت مجهولة ، فلن يكون علينا لإزالة النوعية الكمومية ، سوى ترجمتها إلى تعابير أكثر ألفة تؤول بعد ذلك إلى التمثيل الشائع الكلاسيكي . وهذا بالتحديد ما تدور حوله مفارقة أ . ب . ر (أينشتين ، بودولسكي Podolski ، روزن Rosen) التي توصلت فعلاً إلى وضع هذه النوعية الكمومية في ميزان المعايير والتصورات الكلاسيكية ، منتقدة إياها بعنف . والشيء الذي ستظهره اختبارات « نظرية بل Bell » (التي سيرد الحديث عنها) تجريبياً ، بموجب هذه المفارقة،هو واحد من أمرين : إما أن النوعية الكمومية ليست سوى غلاف ظاهري يمكن أن يتحلل إلى ظواهر خلفية (« موضعية ») نستطيع معرفتها بواسطة تصورات ومفاهيم كلاسيكية ، وإما أن هذه النوعية الكمومية ، هي على العكس ، غير ممكن إرجاعها إلى مقتضيات التمثيل الكلاسيكي .

أما الطريقة الثانية للتفكير في البديل بغرض التوصل إلى جعل عين المسافر تقوم بعملية مطابقة على الأشياء التي يلاحظها من وراء نافذته ، فهي التالية ، وهي أن لانعود إلى طرق الرؤية القديمة وإلى المفاهيم القديمة ، بل نعد طرقاً جديدة مؤهلة لتفسير الموضوع كما يعرض أمام المراقب دون أن نفترض أن لهذا الموضوع وجهاً مجهولاً ، وأن نتيقن إجمالاً ، بحسب تعبير لانجوفان « أن المفاهيم والأفكار التي كانت صالحة في عالمنا الماكروي (أو الجهري) ، أصبحت الآن ، في حالة العالم الميكروي (أو المجهري ، أي عالم الذرات والجسيمات) غير كافية »[1] . وهذا يعني بأحد جوانبه أن ننظر إلى المفاهيم الكمومية كما تصف هذا الشيء ، فنأخذها لذاتها مثلما هي عليه . فهذا الرأي يخالف الوضعية والإجرائية ، ويأخذ على عاتقه بأن يعيد لفكرة الموضوعية ، أي لفكرة الواقع الموضوعي والمستقل عن الفكر وعن أدواته كامل حقوقها . ولكي يصل إلى ذلك ، كان لابد له من السير بعكس الواقعية الكلاسيكية ، وذلك بأن يجري تعديلات في مفهومي

(١) بول لانجوفان Paul Langevin «La Notion de corpuscules et d'atomes» باريس ١٩٣٣ . انظر القسم الأول ص ١٧٩ ، ١٨٠ مثلاً حول هذه المحدودية في المفاهيم القديمة .

الحتميـة والسببيـة الكـلاسيكيـين ، فهو يقر بوجود حتمية وسببية ، ولكن يعدل فيهما بالنسبـة لتصورهما السـابق . فما يدعوه حتمية هو الضرورة التي توجب شرح الظواهر بقوانين وبنظرية تفسر هذه القوانين ، ومايدعوه ، سببية هو تطلب المفعول (أو الأثر) لأن يكون راجعاً إلى سبب . إن هذه الحتمية وهذه السببية لايعبر عنهما بالضرورة ، من وجهتي النظر هاتين ، بدلالة إحداثيات المكان أو الزمان أو السرعة ، بل يعبر عنهما بمفاهيم تصدر عن شكلية النظرية الكمومية ذاتها ، وأعني بالشكلية ، تلك المصفوفات والمؤثرات والعـلاقات اللاتبـادليـة التي سبق الحديث عنهـا . إن النظرية الكمومية ، إذا نظرنا إليها لذاتها ، فإنها تعالج الأمور مستعينة بهذه المفاهيم والمعاني . صحيح أنها تلعب ، وإلى حد ما ، على طرفين ، لأنها تتنـاول الأمور كذلك مستعينـة بمفـاهيم أو أفكار كلاسيكية ، وبخاصة عندما تصوَغ معادلة من معادلات الحركة منسوبة للمكان والزمان ، أو لكميات أخرى قابلة لأن تلاحظ مباشرة ، إلا أن المسافر الذي يتبنى طريقة النظر هذه إلى الأمور ــ والتي سندعوها « الواقعية النقدية » ــ سيصرح دون مواربة أن ما يفعله عند ذلك هو مجرد **إسقاطات** على أسـلوب قديم في **التصور** ليس متأصـلاً أو صميمياً في ميكانيك الكم . فهو لايرى مانعاً أبداً من أن يعتبر هذه الإسقاطات ضرورية عندما يراد النظر في الأمور ، ولكنه يعترف في الوقت نفسه أن ليس لها علاقة بالأشياء الملاحظة بحد ذاتها إلا بقدر ما للصورة الفوتوغرافية المصورة على الورقة من علاقة بالأفراد أو الأشياء الواقعية التي تصورها . وهو يتمسك بصلابة وعناد بالرأي القائل إن الأشياء الكمومية لاهي بأمواج ولاهي بجسيمات ، وإنما هي أشياء واقعية ذات طبيعة مختلفة ــ يسميها بانيش هوفمان مثل إدنجتون Eddington « **أونديكولات** » ، بينما يسميها ماريوبونج Bunge « **كوانتونات** » . أما تمثيلها بجسيمات أو بأمواج ، فليس سوى تصوير فوتوغرافي (أو إسقاط) على نظام الجسيمات أو على نظام الأمواج .

طبعـاً ، يمكننـا أن نعـترض على هذا المســافر « الواقعي النقـدي » بـأن كل ما فعله هو أنه أعرب عن نزعة ورعة أو تصوفية ، وأن المرء لايستطيع الحديث عما لايراه . ولكن هذا الاعتراض يحصر نفسه من جديد في تصور نفعي للواقع الفيزيائي يقوم على استخدام هذا الواقع وسيلة للبقاء ضمن دائرة حجة التصور وافتراضـاته المسبقة .

ويمكن طبعاً اختيار هذا الموقف أو ذاك ، إلا أن أحدهما على الأرجح هو المعقول . ولكن ميزة الواقعية النقدية هي أنها تضع بدقة الحد الفاصل بين ما تقوله ، وبين ما تراه ، وبين ما هو كائن فعلاً . وهي لاتخشى الحديث عن تمثيل واقع بذاته ، ولا التمييز بين هذا الواقع كما يتراءى للفكر النظري وبين هذا التمثيل المرتسم (أي المفاهيم والعبارات الرياضية) أي بين الشيء نفسه وبين الشاشة التي نراه عليها . وهنا قد تستعيد هذه الملاحظة في ذهن البعض فكرة أسطورة الكهف التي تحدث عنها أفلاطون في « جمهوريته » : إن ما نراه من الأشياء ليس سوى ظلالها على جدار الكهف . ولكن الواقع الحقيقي عند أفلاطون هي فكرة مجردة غير مادية ، وأما مادتها (أي الظلال التي نراها) فليست سوى أمور متدنية منحطة (أي دون مرتبة الجوهر أو المثل الأعلى الذي لانراه) . ولاعجب فأفلاطون كان وريث فيثاغورث ، وكان الواقع الحقيقي الوحيد بالنسبة لهذا الأخير هو الأعداد . وقد رأينا في القسم الأول من الكتاب كم هي كبيرة أهمية هذه الأعداد في ميكانيك الكم[(١)] ، فقد بلغت مابلغته بفضل الأعداد الكمومية أو بفضل الشكلية المجردة والرياضية ، حتى أن البعض فكر بالعودة إلى وجهات نظر مشابهة لوجهة نظر أفلاطون ، ولاسيما هيزنبرغ في آخر أيامه[(٢)] . إلا أن المغالاة في هذا الشأن ستكون تجاوزاً فوق مدلول التجريد الرياضي في فيزياء الكم . ذلك أن المفهوم الفيزيائي بالمعنى الحديث ، مهما بدا التعبير فيه أثيرياً محلقاً ، إلا أنه لايرتد إلى الفكرة الأفلاطونية ، لأن الفيزيائي يملك وسائله الفعلية التطبيقية التي تمكنه من إحاطة الحقيقة الواقعية التي تحدثه عنها مفاهيمه ، وبالتالي تحديدها . وما نظرية الكم التي أوحى بها التجريب بمعناه الواسع ، سوى واحدة من هذه الوسائل ، فهي لاتكتفي بأوهام وتهيؤات التأمل المثالية ، بل تصطدم بالضرورة الصلبة التي تحتم عليها تفسير الظواهر . وهذا سبب مسلكها الجريء المغامر الذي يتلمس طريقه كما رأينا .

وعلى هذا فإن الفيزيائي مكلف بأن يقول إن النظرية الفيزيائية ليست مجموعة من « الوصفات » ، بل إن غرضها هو أن تعني بحديثها « أشياء » معينة

(١) انظر ص ١٢٤ ، ١٢٥ إن مثال الأوتار المهتزة الذي استعمل في شرح كيفية وضع مدارات ذرة بوهر ، في وضع كمومي عن طريق الأعداد الكمومية . هذا المثال مأخوذ تحديداً من فيثاغورث .

(٢) من هؤلاء مثلاً جيمس جينز Jeans : والمقصود بوجهة نظر أفلاطون ، هو طبعاً فكرة الظلال في الكهف (المترجم) .

و« عناصر واقعية » . وهذه الأشياء الكمومية ، تريد النظرية أن تتحدث عنها بمعزل عن المفاهيم الكلاسيكية وعن الإسقاطات التي أثيرت قضيتها أعلاه . وهي تعرف أن ذلك باستطاعتها ، وأنها ملزمة أحياناً بفعل ذلك ، ولاسيا عندما تكون هناك خاصة لامثيل لها في الفيزياء الكلاسيكية . وهذا مثلاً حالها تجاه خاصة عدم إمكان التمييز بين الجسيمات ، فقد نجم عنه مبدأ الاستبعاد لباولي . ذلك أن التصورات الكلاسيكية تفشل في إعطاء تمثيل معقول لقوى المبادلات ، بينما قد تبدو هذه القوى ضرورية لتفسير هذه الخاصة في الجسيمات التي لايمكن التمييز بينها ، بأنها يمكن أن تكون في الوقت نفسه في هذا المكان وفي ذاك الآخر ـــ أو على الأقل في أن تعطي انطباعاً بذلك[1] .

١ ـــ الحالتان الأساسيتان لجزيء البنزن

الشكل ٢ ـــ ١ (أ)

٢ ـــ حالتا الأورتو ديرومو بنزن

(b)

ـــ الشكل ٢ ـــ ١ (ب)

(١) انظر القسم الأول ص ٨٠ حتى آخر الفصل وكذلك ص ١٩٢ وما بعدها .

ثم إن المعالجة الكمومية لدوال الموجة أو دوال الحالة ، تساعدنا على تفسير خواص في المنظومة ليس لها نظير كلاسيكي . ولدينا مثال نموذجي على ذلك هو خليط الحالات ، الذي لايمكن فهمه في التصورات الكلاسيكية ، في حين أننا نجد أمثلة عديدة عليه في الفيزياء الذرية وفي فيزياء الجسيمات . لنأخذ مثلاً جزيء البنزن الممثل في الشكل ٢ ــ ١ : إنه يحوي ٦ ذرات هيدروجين و٦ ذرات كربون مرتبة في وضع تناظري (بحيث كل وصلة وحيدة في الشكل تمثل رابطة تشاركية ، أي تمثل زوجاً من الإلكترونات لهما سبينان متعاكسان ، وكل وصلة مزدوجة تقابل رابطة مزدوجة ،أي تقابل زوجين من الإلكترونات) . ذلك أن ذرة الهيدروجين لها إلكترون وحيد تشارك به ، وذرة الكربون لها أربعة[١] إلكترونات لهذا الغرض . فذرة البنزن ، على الرغم من مظهرها التناظري ، إلا أن لها حالتين مختلفتين : إذ إنها بقفزة واحدة من إلكتروناتها ، يمكن أن تتحول من حالة إلى أخرى . ويختلف حساب طاقة سويتها الأساسية حسبما نعتبرها تراكماً من الحالتين الأساسيتين (كما هو مبين في الشكل ٢ ــ ١) أو نعتبرها مؤلفة من حالة واحدة.(وعدم تماثل الحالتين واضح جداً ، إذ لو استبدلنا بذرتي هيدروجين متجاورتين ذرتا بروم مثلاً لكي نشكل **أورتودي برومو بنزن** ، لوجدنا أننا أمام حالتين مختلفتين ، وذلك حسبما تكون ذرتا البروم ، تفصل بينهما : رابطة بسيطة ، أو مضاعفة . ومع ذلك ينشأ عن هذا العمل مركب كيماوي واحد هو تراكم هاتين الحالتين) . إن قيمة الطاقة الأساسية المشاهدة تؤكد صحة المعالجة الكمومية[٢] تأكيداً جيداً .

إن طبيعة هذه الخواص كلها هي من النوعية الكمومية . وعلى هذا فإن رحالتنا إلى عالم الكم سيخلص بعد أن يتخلق بأخلاق الكم ولغته ، إلى أن شكلية نظرية الكم ، إذا ما بدت أنها هي الوحيدة التي نجحت في فهم الخواص التي من

---

(١) بما أن الإلكترونين الآخرين للكاربون موضوعان على الطبقة الداخلية المغلقة ، فهما لايساهمان في خواصه الكيميائية .

(٢) يلجأ فيزيائيو الجسيمات إلى أسلوب مماثل لمعالجة الموزونات K° بأن يرجعوها إلى تراكم حالات أساسية وهو تراكم يتطور مع الزمن تبعاً لخواص هذه الحالات الأساسية (التفكك التلقائي السريع أو البطيء) بمعنى أن تركيب « خليط الحالات » يطرأ عليه التعديل ، مظهراً حالات (ميزونات K° مضادة) التي لم تكن موجودة في الحالة الابتدائية .

قبيل خواص البنزن ، فما ذلك إلا دليل على أن هناك حقائق في ميدان الكم تشذ عن الفكر الكلاسيكي . والحقيقة ، لقد أمكن إقامة دليل من هذا النوع بشأن ظواهر أخرى عديدة ، فنحن لم نثر حتى الآن سوى مشكلة عدم التمايز ومبدأ الاستبعاد ، ولكننا سنرى بعد قليل أن الحجة ذاتها يمكن أن تتخذ بالنسبة لعدم قابلية الفصل .

٢ ــ اللاانفصالية والترابطات الكمومية عن بعد
« مفارقة » أينشتين ، بودلسكي ، روزن وتطوراتها

في عــام ١٩٣٥ تقــدم أينشتــين بـالتعــاون مع ب . بودولسـكي Boris Podolski ، ون . روزن Nathan Rosen باعتراض هام ينتقدون فيه ميكانيك الكم . وكان اعتراضهم على درجة كبيرة من الأهمية ، حتى أنه لايزال إلى اليوم يثير جدلاً بين مؤيدي تفســير كوبنهـاغن وبين معـارضيه . وكانت إثباتات الطرفين ، في أثناء ذلك ، وحججهم ، تتحسن وتتشذب باستمرار مع تطور النقاش ، إلى أن بلغت أوجها في عام ١٩٦٥ عند الفـيزيائي الإيرلندي ج. س. بل John S. Bell ، الذي يعمـل في المركز الأوربي للأبحـاث النــوويـة CERN في جنيف ، إذ لم يقتصر عمــل هذا على تقـديم ملاحظات فلسفية فحسب ، بل تجريبية أيضـاً . وماهذا الفصل سوى محاولة لتقديم عرض لهذا الجدل حول « اللاانفصالية الكمومية » .

كان أينشتــين كما رأينــا ، من رواد نظـريـة الكــم الأوائـل . فمســاهمـاته فيها في العامين ١٩٠٥ و١٩١٧ تعد مراحل حاسمة في تطورها . إلا أنه لم يكن قانعاً بتأويل بوهر وهيزنبرغ ومدرسة كوبنهاغن عامة . لأن القول بأن النظرية لايمكنها أن تتنبأ إلا بالاحتمالات ، وأن السببيـة مشكوك في أمرها (أو كما أباح البعض لنفســه مثـل ب . جوردان أن يزعم بأن المـلاحظـة لاتشوش القياس فحسب ، بل تحدثه ، أي أن معرفة الحقيقة الخارجية محكوم عليها بالاستحالة ، وأن لاأهمية لها بصراحة) كل ذلك ،كان يصدم أينشتـين بعمق . لذلك كان يرى أن ميكـانيك الكـم ، الذي هيـأ الفرصــة لمثل هذه الأحكـام ، لم يكن هو النظرية التي ينتظرها ، أي النظرية التي تصور الحقيقة الفيزيائية وتفسرها . غير أن هذا لايعني أن صحة ميكانيك الكم كانت عنده موضع شك ، فهو

من خيرة من يعلمون أن هذه النظرية قد اجتازت كل اختباراتها بنجاح . ولكنه كان يشك بأنها نظرية كاملة .

ومـا كان يقصـده من نظـرية كاملة ، هو نظـرية « يكـون فيهـا لكـل عنصر من الحقيقة الفيزيائية مقابل في النظرية الفيزيائية » . أما ما يجب أن نفهمه من عبارة « عناصر الحقيقة الفيزيائية » فهو ، بحسب ما يقول أينشتين ومعاونوه ، يتعين بالمعيار التالي : إذا استطعنا أن نتنبأ بيقين (أي باحتمال يساوي الواحد) بقيمة كمية فيزيائية **دون أن نحدث أي اضطراب في المنظومة** ، فعند ذلك يوجد عنصر حقيقة فيزيائية مقابل لهذه الكمية الفيزيائية »[1] .

ولقـد أدى تطبيـق هـذا المعيـار على نظـريـة الكـم إلى مـا ندعوه بـ « مفارقة أينشتين، بودولسكي ، روزن »(اختصاراً أ. ب. ر). وكان الباعث على إثارة هذه المفارقة أصلاً هو لاتبادلية كل مؤثرين كموميين يمثلان كميتين مترافقتين . فمن هذه اللاتبادلية تنشأ علاقات هيزنبرغ التي تدعى « علاقات الارتياب »[2] . فإذا كانت الكمية المأخوذة مقابل عنصر من الحقيقة الفيزيائية هي دفع جسيم (أي أن هذا الدفع يمكن تعيينه بدقة) ، فإن إحداثي وضع الجسيم لايمكن الحصول عليه بيقين . فبحسب معيارنا المنصوص عنه أعلاه ، لايقابل هذا الإحداثي حقيقة فيزيائية . فنحن تجاه هذا الوضع أمام واحد من أمرين : إما أن الكميتين المرعيتين (p الدفع ، x الإحداثي) ليس لهما معاً حقيقة فيزيائية (وعندئذ لاأهمية لإمكان أو عدم إمكان تعيينهما بدقة) ، وإما أن لهما معاً حقيقة فيزيائية . وفي هذه الحالة الأخيرة ، يكون ميكانيك الكم نظرية غير كاملة ، لأنه عاجز عن إيضاح هذه الحقيقة . إذ لايمكن ، بحسب تأويل كوبنهاغن الشائع ، أن يكون للكميتين المترافقتين في وقت واحد حقيقة فيزيائية ، وذلك بسبب التشويش الفيزيائي الطارئ على المنظومة التي هي موضوع الاختبار نتيجة عملية القياس (إن قياس x يعدل من حالة المنظومة ، إذاً p تتعدل ، ولايمكن بعدئذ قياس قيمتها التي

---

(١) لقد رأى أينشتين وبودولسكي وروزن (اختصاراً أ .ب .ر) أن هذا المعيار كافٍ ولكنه ليس لازماً (والكلمات التي كتبت بالخط العريض ، شدد عليها المؤلف نفسه وليس أ .ب .ر) .

(٢) انظر القسم الأول ص ١٥٩ حتى آخر الفصل .

كانت عليها وقت قياس x) . ولذلك تخيل أينشتين وبودولسكي وروزن تجربة تخطئ هذا التفسير . ونعني بذلك ، تجربة يمكن أن نعرف فيها الكميتين المترافقتين دون أن نحدث أي تشويش نتيجة القياس . فإذا كانت هذه التجربة ممكنة فعلاً ، وكانت بالتالي كل من الكميتين الملاحظتين (x و p ، أو كل زوج من متغيرين مترافقين) مقابلة لعنصر حقيقة فيزيائية فعندئذ تكون هذه النظرية (أي نظرية الكم) غير كاملة ، لأنها لاتستطيع أن تمثل هذا العنصر كما رأينا .

ولقد كان إثبات أ . ب . ر هو التالي [١] : لنأخذ جزيئاً M سبينه صفر في وضع السكون (الشكل ٢ — ٢) ، وليكن مؤلفاً من ذرتين متطابقتين a و b لكل منهما سبين نصف صحيح[٢] . (يعرف لنا هذا الجزيء حالة ابتدائية يمثلها ميكانيك الكم بدالة الموجه ψ_i). ولنتخيل أن هذا الجزيء قد انشطر تلقائياً إلى ذرتيه a و b . إن هاتين الذرتين ستبتعد إحداهما عن الأخرى في اتجاه معاكس لها مباشرة ، فكل تأثير متبادل بينهما سيزول بعدما تجتازان مسافة معينة. وهنا دعونا نتأمل في هذه الحالة النهائية : إننا نستطيع أن ننظر إليها من ناحيتين : الأولى هي أن نعتبر مجموعة الذرتين منظومة واحدة هي المنظومة الشاملة النهائية ، وتمثل بدالة موجه ψ_f ، الثانية هي أن نعتبر كلاً من الذرتين a و b منفصلتين بشكل إفرادي ، ويمثلهما على التوالي الدالتان ψ_a ، ψ_b .

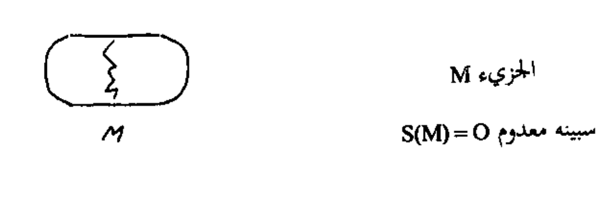
إن الجسيمين a و b ، على الرغم من أنهما منفصلين ، إلا أنهما يرتبطان بعلاقة تظل ذكرى لماضيهما المشترك ولأصلهما المشترك . ولاحاجة ، لأجل ذلك ، للاستعانة بميكانيك الكم . فحتى في الميكانيك الكلاسيكي ، تؤدي قوانين الانحفاظ إلى علاقات بين خواص الجسيمين a و b . فمثلاً يقتضي انحفاظ الدفع ، (باعتبار أن الذرتين في مثالنا الحالي لهما كتلة واحدة) أن تسير الذرتان بسرعة واحدة في

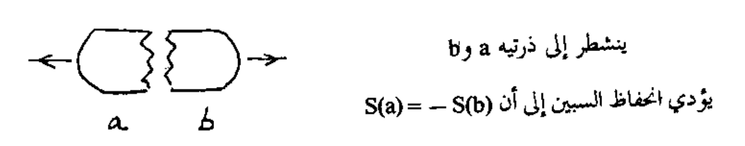
---

(١) المثال المعروض هنا هو المثال الأبسط الذي عرضه د . بوهم **David Bohm** في كتابه حول نظرية الكم (١٩٥١) .

(٢) حول السبين ، انظر القسم الأول . أما بالنسبة للإثبات فلا علاقة له بمدلول السبين بالضبط ، بل يكفي أن نعرف أن له مركبتين غير متوائمتين ، بمعنى أنهما يقابلان كميتين لاتبادليتين ($S_x S_y \neq S_y S_x$) فلا يمكن معرفتهما معاً بدقة .

اتجاهين متعاكسين[١] . ويقتضي انحفاظ العزم الزاوي الكلي أيضاً أن يكون لسبينيهما اتجاهان متعاكسان .





الذرتان a و b ، بعد انفصالهما ، تبتعد إحداهما عن الأخرى

a　　b

الشكل ٢ ــ ٢

إذاً ، بوجه عام ، كل قياس لدفع الذرة a أو سبينها ، سيعطينا بدقة ، القيمة المناظرة له بالنسبة للذرة b . فمن باب أولى إذاً أن يظل ذلك صحيحاً فيما لو قسنا هذه المركبة أو تلك من مركبات السبين وفق المحاور الإحداثية الثلاثة z,y,x .

وهنا يأتي دور الشيء الجديد الذي أتى به ميكانيك الكم : لقد رأينا أننا إذا أخذنا جسيماً a لاعلى التعيين ، وقسنا إحدى مركبات سبينه ، ولتكن $S_x(a)$ مثلاً ، فإن هذا القياس يشوش حالة الجسيم ، ويجعل القياس المتزامن معه لأي مركبة أخرى ،

---

(١) بما أن $P(M) = P(a) + P(b) = O$
إذاً $P(a) = - P(b)$
وبما أن $p = mv$ ، إذاً $v(a) = - v(b)$

ولتكن $S_y(a)$ مثلاً ، مستحيلاً . ولكننا في حالة الجزيء M ، نستطيع معرفة $S_x(a)$ بالتحديد دون حاجة لقياسه ، وذلك وفقاً للملاحظة العامة التي ذكرناها ؛ إذ يكفي أن نقيس السبين Sx للجسيم b ، فنكون على يقين تام بأن السبين Sx للجسيم a يساويه ويعاكسه[1] . أي: $S_x(a) = -S_x(b)$. فلا يمكن إذاً أن نحدث اضطراباً نتيجة لقياس نجريه على الجسيم a ، لأننا اكتفينا بإجراء القياس على الجسيم b ، ولأن هذا ، أي b ، لم يعد يتبادل ، لا تأثيراً ولاتفاعلاً مع الجسيم a الذي ابتعد عنه قدر ما نشاء (فلربما كان أحدهما في لندن ، والآخر أصبح في طوكيو) . فبحسب التعريف الذي اعتمد أعلاه ، يمكن القول إن $S_x(a)$ عنصر من الحقيقة موجود بمعزل عن كل قياس ، وقد أمكن التنبؤ به « دون إحداث أي اضطراب في المنظومة » . لابل كان بمقدورنا الأخذ بهذه الحجة نفسها بالنسبة لمركبتي سبين a الباقيتين[2] ، أي $S_y(a)$ و $S_z(a)$. بمعنى أن كلاً منهما يقابل عنصراً من الحقيقة بحسب التعريف . في حين أن ميكانيك الكم لايسمح بإعطاء قيمة مضبوطة إلا لمركبة واحدة بين المركبات الثلاث في وقت واحد (فإذا وصف $S_x(a)$ ، فإنه لايمكن أن يصف $S_y(a)$ ولا $S_z(a)$) . وهذا وجه المفارقة التي يشار إليها باسم مفارقة أ ب ر ، التي خلص منها واضعوها إلى القول : إن ميكانيك الكم ليس نظرية كاملة (إذ يوجد عنصر حقيقة فيزيائية ، لانستطيع أن نتنبأ به) .

ويمكن أن ننظر إلى هذه التجربة بطريقة أخرى مكافئة ، هي التالية : بما أننا حصلنا على $S_x(a)$ دون أن نجري قياساً مباشراً على a ، فليس ما يمنع من أن نقيس $S_y(a)$ مباشرة (لأننا لم نحدث أي تشويش سابق عند قياس $S_x(a)$) . ولكن ميكانيك الكم ينص على أن معرفة $S_x(a)$ و $S_y(a)$ في وقت واحد مستحيلة .

وهكذا نرى أن الاعتراض وجيه جداً ، وهذا أمر لاشك فيه . ولكن بوهر سرعان ما وجد رداً عليه . فقد أجاب في العدد التالي من مجلة Physical Review (عام ١٩٣٥) التي سبق أن نشرت مقالة أ ب ر . فقال بوهر : إن الاعتراض

---

(١) بما أن $S(M) = S(a) + S(b) = O$
إذاً $S(a) = -S(b)$

(٢) $S_x(a) = -S_x(b)$ ، $S_y(a) = -S_y(b)$ ، $S_z(a) = -S_z(b)$

لايستند إلى أساس ، لأنه أخطأ منذ البدء بتعريف معيار الحقيقة الواقعية الذي اقترحه أ ب ر . لأن هذا التعريف يستعمل تعبيراً ملتبساً غامضاً في قولهم « إذا استطعنا أن نتنبأ بيقـين ...، **دون أن نحدث أي اضـطراب في المنظومة** ... » . وهنـا ، استعمـل بوهر صيـاغة ، على الرغم من أنها لم تكن واضحـة كما ينبغي ، إلا أننا نستطيع أن نلخصها بقولنا : إن الذرتين a و b ليستا منفصلتين فعلاً ، بل يظل بينهما ارتباط لايمكن إهماله حتى في غياب التأثير المتبادل بينهما . أو بعبارة أخرى ، إن دالة الموجه ψ_f للمنظومة الكلية النهـائيـة ، ليست مجرد تراكم لدالتي المنظومتين المستقلتين ψ_a و ψ_b ، ذلك أن المنظومة النهائية لايمكن فصلها إلى منظومتين جزئيتين a و b . وهذه الخاصة التي تنتج بالفعل من شكل صياغة الدالة الموجية للمنظومات الكمومية ، هي التي دعيت بعد تسمية بوهر لها « اللاانفصالية الكمومية » .

فـالرد الذي قـدمـه بـوهـر إذاً عـلى اعـتراض أ ب ر كان متسـقـاً تمـامـاً مع مبادئ نظرية الكم وشكليتها . ومع ذلك ، فقد كانت هذه الخاصة « اللاانفصالية » تبدو من العسير إعطاؤها شكل مفهوم واضح . إذ كم يتعذر علينا أن نتخيل جسيمين متباعدين جداً ، ومع ذلك يظل بينهما ارتباط من النوع المذكور . والحقيقة أن الموالين لاعتراض أ ب ر لم يكونوا مقتنعين ، لأن الرد على اعتراضهم لم يقدم لهم بشكل منهجي رسمياً وبلغة إجرائية . أو لأن صيغة رد بوهر لا تعدو (بالنسبة إليهم) قوله « إن الأجهزة المعدة لاختبار إحدى الكميتين (p أو J_x) لا تتمشى (أو لاتتواءم) مع الأجهزة المعدة لاختبار الكمية الأخرى المرافقة لها من بين الكميتين (x ، أو J_y)[١] .

والحقيقـة أن التجـربـة التي اقـترحهـا أ ب ر لم تكن تجربـة عمـليـة تُجرى فعلاً ، بل كل ما في الأمر أن النتائج التي تتوصـل إليها هي نتائج تتحدر فحسب من مقدمات دعاويها . لذلك تدعى مثل هذه التجارب في الحقيقة « تجارب فكرية » . وهي تجارب ليس الغرض منها « أن نترك الطبيعة تتحدث ، لكي نأخذ عنها معطيات جديدة

---

(١) لأن إصرارهم على عدم وجود تأثير متبادل هو الذي يجعلهم يفهمون من كلام بوهر أنه يريد وضع المسؤولية على الأجهـزة لاعلى الجسيمـين،لأن الجسيمـين لاجدال عنـدهـم بأنه لايمكن أن يكون بينهمـا تأثير متبـادل (المترجم) .

قد تكون غير متوقعة » ، بل إن الغرض منها ، على العكس ، هو الحصول على جميع نتائج الصياغة النظرية التي في حوزتنا والتي تعتمد بدورها على تجارب أخرى . فهي ، إن صح القول « تجربة منطقية ، وظيفتها إظهار خواص قد تكون موجودة فعلاً ولا ندري بها ، مع أنها متضمنة في التمثيل النظري . وكانت نتيجة تجربة أ ب ر الفكرية ، هي توضيح خاصة في « الأشياء الكمومية » لم تكن قد ظهرت حتى ذلك الوقت ، وهي « اللاانفصالية » .

وقد تطورت كذلك في الوقت نفسه ، إلى جانب هذه الخاصة ، « نظرية كمومية للقياس » سنعود إليها فيما بعد . أما الآن فنكتفي بالقول إنها نبهت كذلك إلى وجود اختلاف مفضوح بين التصورات الكمومية وبين التصورات التي كان يؤخذ بها سابقاً (أي التصورات الكلاسيكية) .

وكان الجدل حول ميكانيك الكم في تلك الفترة ، يتميز بالانشقاق الحاصل بين آراء بوهر ومدرسة كوبنهاغن من طرف ، وبين الآراء التي كان حماتها أينشتين ودوبروي وشرودنجر من طرف آخر .

ولكن بوهر ، لم يعد ميكانيك الكم بالنسبة له يشكل أي صعوبة بعد أن استند إلى مبدأ التكاملية ، خاصة بعد أن سلم مع التقليد المتبع بفكرة الملاحظة التي لاتعدو الموضوعية بالنسبة إليها في نهاية الأمر أكثر من شيء « بين شخصي » (أي متفق عليه بين الأشخاص intersubjectivité) . لذلك كانت اللاانفصالية نتيجة طبيعية لهذه التصورات والآراء .

وأما في الطرف الآخر ، فلم يؤدِ دحض بوهر لمفارقة أ ب ر ، إلى زحزحة أينشتين عن موقفه قيد أنملة . ذلك أن أينشتين ، بصراحة ، لم يقبل بهذه الآراء . فقد كان يرى أنها مجرد « ترقيع » لنظرية الكم تجعل منها « وصفات مفيدة » لا أكثر . بينما دعا هو إلى وضع نظرية أصيلة جوهرية ، تثبت هياكلها في مقتضيات الموضوعية بكل معانيها . بمعنى أن الرجوع فيها (أو الإسناد) إلى المراقب ، لايصح أن يتسرب إطلاقاً إلى تعريف ما يلاحظه ، وأما بناؤها فيجب أن يقوم على عدد صغير من المبادئ المتماسكة ذات الطبيعة الفيزيائية وليس على مبادئ فلسفية كما هو حال تكاملية بوهر . وهكذا بقي إذاً ،

مصراً على مواقفه القائلة : إن ميكانيك الكم ، على الرغم من فائدته وصدق تنبؤاته ، فإن مبادئه ليست مبادئ نظرية مرضية حقاً ، وهو ليس بالتالي عميقاً (جوهرياً) بما يكفي — فهو بهذا المعنى نظرية غير كاملة . وقد تراءى لأينشتين أن الطريق إلى مثل هذه النظرية الكاملة يجب أن تكون طريقاً غير مباشرة . لذلك راح يبحث من جانبه عن نظرية عامة للمادة في اتجاه آخر — وهي نظرية النسبية العامة ، مع صياغة هندسية لحقول التأثير المتبادل . إذ كان يأمل أن تظهر الكموم بشكل طبيعي من مثل هذه الاعتبارات . وعندئذ سيظهر ميكانيك الكم على شكل نظرية تقريبية لهذه النظرية . أي على نحو ما يبدو الميكانيك الكلاسيكي في ظروف أخرى[1] . ولكنه كما نعلم ، لم يتوصل إلى ذلك .

وكان قد ظهر إلى جانب محاولات أينشتين ، اتجاه فكري آخر يختلف عن اتجاه أبحاث أينشتين ، على الرغم مما بينهما من قرابة في عدد من المرامي . وهذا الاتجاه هو ذاك الذي تمثله أسماء لوي دوبروي ودافيد بوهم وآخرون أيضاً . إذ عاد هؤلاء فأخذوا في عام ١٩٥٢ بمسألة الموضوعية والحتمية ، ورأوا أن ميكانيك الكم ، مع صحة نتائجه ، لايتعرض في واقع الأمر إلا إلى قيم متوسطة عن سيرورات خلفية أكثر دقة ونعومة تجري خلف هذا العالم الكمومي الظاهري) ، وهي التي ستعيد بناء الحتمية فيما لو كشفوا عنها . وسيكون ميكانيك الكم ، إلى حد ما ، بالنسبة لآليات المادة الواقعية ، كما كان الترموديناميك في القرن التاسع عشر بالنسبة للحركات الجزيئية . فنحن نعلم أن الكميات البارزة في الترموديناميك (أي الضغط والحجم ودرجة الحرارة) تنسبها النظرية الحركية إلى كميات خاصة بحركات الجزيئات . أي إلى طاقة كل جزيء واندفاعه . فدرجة الحرارة مثلاً هي الأثر الوسطي لطاقات الجزيئات ، والضغط هو نتيجة قوى تصادم الجزيئات مع الجدران وهكذا .. فبحسب وجهة النظر هذه ، يمكن أن تكون الكميات التي تحسب أيضاً عن طريق نظرية الكم — دوال الموجة ، المشاهدات إلخ — هي آثار وسطية ناجمة عن حركات داخلية في المنظومة . ولكن هذه الحركات يجب أن تكون أكثر دقة واختفاء من الظواهر الكمومية الملاحظة . فليس أمامنا إذاً ، في حال ميكانيك الكم ،

---

(١) بالنسبة للميكانيك النسبوي مثلاً (المترجم) .

إلا أن نبحث عن وضع مكافئ لهذا الميكانيك في الصورة التي كانت عليها النظرية الحركية بالنسبة إلى الترموديناميك (والتعبير « ترموديناميك الجسيمات الخفي » هو التعبير الذي استعمله دوبروي بالضبط ليصف به أبحاثه الخاصة) . ولكي نعبر عن معرفتنا لهذه العمليات الداخلية ، نمثلها بـ « بمتغيرات خفية » أو « وسيطات خفية » . وهذه المتغيرات ، طبعاً ، لن تظل « خفية » بعد أن تتوصل هذه النظرية ـــ حين يقوى عودها ـــ إلى إظهارها . أما الآن ، فشرط اتساق ميكانيك الكم مع نظرية كهذه ، هو ، كما في حال الترموديناميك ، أن تستنتج قوانين ميكانيك الكم من حساب القيم الوسطى للكميات المحسوبة من المتغيرات الخفية .

وقد يصبح بالإمكان عندئذ ، أي بعد اللجوء إلى مثل هذه المتغيرات الخفية ، التخلص من الجانب اللاحتمي والاحتمالي في ميكانيك الكم . وعندئذ سيصبح هذا الميكانيك نظرية كاملة من وجهة نظر أينشتين[١] .

والحقيقة أن فرضية المتغيرات الخفية ، كان قد تقدم بها لأول مرة لوي دوبروي نفسه منذ مطلع الثلاثينيات . ولكن ج . فون نيومان J.Von Neumann أعطى في عام ١٩٣٢ برهاناً يثبت فيه أن إدخال مثل هذه المتغيرات لايتمشى مع ميكانيك الكم ، وبيّن أن متوسط قيم هذه المتغيرات لايمكن أن تستنتج منه قوانين ميكانيك الكم بشكل صحيح[٢] . وهكذا ظل لوي دوبروي لفترة من الزمن مقتنعاً بضرورة التخلي عن كل أمل بالعودة إلى الحتمية ، وانضم إلى السنة الغالبة (أي مدرسة كوبنهاغن) لمدة سنوات طويلة . ولكنه ، في عام ١٩٥٢ ، عدل عن ذلك ، وعاد إلى مسعاه الأول بعد مقالة نشرها بوهم ووسعها بعده دوبروي نفسه . والحقيقة أن برهان فون نيومان كان يستعين بحالات نوعية خاصة . وقد اعترض عليه كثيرون . ثم حاول بعضهم أن يعودوا إليه ليضعوه على أسس أكثر عمومية ، ولكنهم لم يتوصلوا إلى الشمولية الكافية . لذلك لم يعد ثمة ما يمنع من تصور متغيرات خفية يعطينا وسطيها الإحصائي نتائج نظرية

(١) على الرغم من أن أينشتين نفسه لم يحاول « إكماله » في هذا الاتجاه .

(٢) يمكن للقارئ أن يأخذ فكرة عن هذا البرهان من كتاب م.أ.تونيلا « لوي دوبروي والميكانيك التموجي » منشورات وزارة الثقافة ١٩٧٤ (المترجم) .

الكم . وقد قدمت بالفعل نماذج متعددة عن ذلك ، مع أن المقابل الفيزيائي لهذه المتغيرات الخفية لم يكن واضحاً أبداً . فليس من سبيل لتفسير اللاانفصالية من زاوية المناداة « بالحتمية »[1] إلا بهذه التحديدات determination المضمرة (أي يوجد مقادير كامنة خفية يمكن تحديدها دون ارتياب) .

إلا أن جون بل خطا في عام ١٩٦٥ خطوة هامة إلى الأمام في هذه الإشكالية . فحتى ذلك الحين ، كانت وجهة النظر حول هذا الموضوع هي مسألة ذوق وتطلع فلسفي ، فلايمكن البرهان عليها أو دحضها ـــ لأن حاملها كان يشترط على نفسه إعادة بناء ميكانيك الكم من جديد (اعتماداً على مبادئ محددة يختارها)، وهذه ضرورة شكلية (أو صورية) Formelle عند بعضهم (أي لاأهمية لطريقة اختيارها من وجهة فيزيائية بحتة) ، وأما بالنسبة للآخرين فلا تمثل سوى فرضية زائدة . غير أن بل برهن أن المسألة ليست مسألة فلسفة ومنطق ، بل على العكس ، يمكن البت بأمرها تجريبياً .

بالفعل : لقد رأينا أن التجربة الفكرية التي عرضها أ ب ر كانت تتعلق بجزيء واحد ينشطر إلى ذرتين . ولما كان توجيه سبين هاتين الذرتين ليس سوى استقطابهما ، فمنحى الاستقطاب ، وبالتالي قيمة السبين وفق هذا المنحى ، يمكن الحصول عليها بطريقة تشبه طريقة الحصول على استقطاب الضوء باستخدام الرقاقات الزجاجية المقطبة التي تكشف استقطاب الضوء المنعكس على سطح البحر أو على لوح زجاجي (إذ يبلغ التألق أقصاه في اتجاه الاستقطاب) . فمن الممكن قياس اتجاه سبين الذرتين بواسطة مقياسي استقطاب A وB : يوضع أحدهما في طريق الذرة a ، والآخر في طريق الذرة b ، وبحيث يكون ، هذا وذاك ، مفرعين على شكل زاوية قائمة . وعندئذ يعطياننا قياسي الاستقطابين (أو اتجاهي السبين) في منحيين متعامدين على التوالي ، إذ يعطينا اتجاه مقياس الاستقطاب B قياس $S_x(b)$ ، واتجاه مقياس الاستقطاب A قياس $S_y(a)$. ولكن هذه التجربة لايمكن إجراؤها في الواقع إلا على عدد كبير من الجزيئات

---

(١) الحتمية هنا بمعنى إحياء الحتمية الكلاسيكية التي تقول بإمكان معرفة وضع الجسيم واندفاعه في آن واحد .

المتماثلة تماماً ، فالمعلومات المقروءة على مقياس الاستقطاب ، لاتفيد إلا بمعرفة المتوسطات الإحصائية . إذ إن ما يقاس ليس أبداً الذرتان a وb اللتان كانتا تشكلان الجزيء الأصلي M ، بل متوسطات إحصائية عن M وعن a وعن b ، باعتبار أن كل واحد من هذه التوزيعات الإحصائية يؤخذ بمعزل عن الآخر . وعلى هذا الأساس طرح بل على نفسه المسألة التالية : ضمن أي الشروط يمكن تحسين تجربة هذا وضعها وظروفها لكي تعطي نتائج حاسمة ؟ ولقد تمكن بل بالفعل من الحصول على هذه الشروط بأن حدد شرط الموضعية condition de localité . ثم بالاعتماد على هذا الشرط ، توصل — ضمن ظروف تجربته أيضاً — إلى علاقات ارتباط بين التوزيعات الإحصائية الملاحظة ، أو بعبارة أخرى ، لقد توصل بل إلى صياغة شرط الموضعية على شكل « علاقات ارتباط »[1] بين التوزيعات التي يمكن الحصول عليها بالاعتماد على قياسات تتم بواسطة A وبواسطة B .

والحقيقة أن « شرط الموضعية » ما هو إلا التعبير عن الشرط الذي بدا لأينشتين طبيعياً جداً ، ولامجال للطعن فيه ، وهو أن كلاً من الجسيمين a وb ، يصبح بعد أن ينفصلا (كلاً في ناحيته أو في موضعه) ذا خواص مستقلة عن الآخر ، أي أنه يشكل وحده منظومة ، وأنه لابد بالتالي أن يكون بالإمكان تعيين هذه الخواص دون الرجوع إلى الجسيم الثاني . أو يقال بشكل آخر ، إن نتيجة أي قياس بمقياس الاستقطاب A على الذرة a ، ستكون مستقلة عن الذرة b ، والعكس بالعكس .

وبعد أن حدد بل شرط الموضعية والعلاقات المترتبة عليه ، قرر البحث عن محك يمتحن به مسألة الموضعية هذه . فراح ينظر ، لأجل ذلك ، في جملة ما يمكن تصوره من النظريات الحتمية الموضعية . ففي هذه النظريات يمكن التعبير عن الحتمية بافتراض وجود « وسيطات خفية » تفيد ، كما أشير سابقاً ، في تأمين وصف كامل (أي دون ارتياب) للمنظومات الذرية المرعية . وبما أننا نجهل قيم هذه الوسيطات الخفية ، فما علينا إلا أن ننظر في آثارها وسطياً . ولكن فرض وجودها لن يترك عبارة الاستقطابين في A وB على حالها ، لأن هذين الاستقطابين تابعان لزاوية مقياسي الاستقطاب و للمتغير

(١) بمعنى أن هذه العلاقات تكون محققة دوماً في حال توفر الموضعية ولاتكون محققة دوماً في حال غيابها (المترجم) .

الخفي الذي أدخل (إذ سنفرض للسهولة أن هناك متغيراً خفياً واحداً يمكن أن يأخذ هذه القيمة أو تلك) . لذلك نقوم بتقدير بعض المتوسطات عن قيم المتغير الخفي ، وبذلك نتمكن من الحصول على قيم متوسطة عن الاستقطابين في A وفي B ، وعن الارتباطات القائمة بين هذين الاستقطابين . وهنا يتدخل « شرط الموضعية » بأن يحتم أن تكون نتيجة قياس a في وA مستقلة عن اتجاه مقياس الاستقطاب الذي يقيس استقطاب b في B ، وبالعكس . الأمر الذي يعني ان التوزيعين في A وفي B يمكن النظر إلى كل منهما بمعزل عن الآخر . وهذا ناجم عن عدم وجود شرط صارم للارتباط في هذه الحالة المتصفة بالحتمية الموضعية .

ولكن يمكن أن نحصل مع ذلك ، بالاستناد إلى الارتباط بين الاستقطابين في A وفي B على « حدود (عليا أو دنيا) للارتباطات » . بالفعل ، إذا اعتبرنا توجيهات جديدة للمقطبين ، عندئذ يبرهن أن دوال الارتباط المتعلقة بكل زوج من الاتجاهات (للذرتين a وb) يمكن أن تشكل ، عند مقارنة بعضها مع بعض ، عدداً من المتراجحات . فعلى سبيل المثال ، إذا كانت $P(\alpha, \beta)$ دالة الارتباط لزاويتي التوجيه α وβ ، وكانت γ تحدد اتجاهاً ثالثاً ، عندئذ يكون لدينا ، عند تغيير اختيارنا لاتجاهات مقياسي الاستقطاب A وB ، أي للزوايا γ وβ وα المتراجحة .

$$|P(\alpha, \beta) - P(\alpha, \gamma)| \leq 1 + P(\beta + \gamma)$$ [1]

وليس في ذلك سر ، لأن كل توزيع لأزواج الخواص التي تنتقى وفق معايير معينة ، يمكن أن يؤدي إلى مثل هذه المتراجحات . فمثلاً يقترح ب . ديسبانيات[٢] في جملة ما يقترحه المثال التالي : نعتبر جماهير من الطلاب المكونين من

(١) الخطان القائمان المحيطان بعبارة الطرف الأول من المتراجحة ، يشيران إلى أن القيمة المقصودة هي القيمة المطلقة ، أي الموجبة دوماً ، للفرق ، بغض النظر عن أي الحدين أصغر . (α زاوية التوجيه للأولى ، β للثانية ، وγ كذلك للثانية بعد تغيير اتجاه المقطب الثاني ، وهنا يجدر بنا أن ننبه إلى أن المتراجحة قد يكون فيها خطأ مطبعي) . (المترجم)

(٢) «A la recherche du rëel, le regard d'un physicien»: Bernard d'Espagnat 1979 أو «Theorie quantique et realité» للمؤلف نفسه . مجلة «Pour la Seience» العدد ٢٧ ، كانون الثاني/يناير ١٩٨٠ ص٨٢ ، ٧٢ (الطبعة الفرنسية لمجلة Scientific American (يجد القارئ ترجمة لهذه المقالة في نهاية الكتاب ، فهي تعطي توضيحاً أكثر حول هذه المسألة (المترجم)).

أزواج التوائم الحقيقيين الذين يملك كل شقيقين منهم المؤهل والتربية نفسها ، والذين سيخضع كل فرد منهم لامتحان في اللاتينية واليونانية والصينية . ولكن على أن لايخضع كل توأم من توأمين شقيقين إلا لامتحان واحد مختلف عن شقيقه . وتجري الفحوص في ثلاثة قاعات منفصلة ، وبحيث لايمكن لتوأمين شقيقين أن يؤثر أحدهما في الآخر عن بعد ، عندئذ يبرهن بسهولة أن عدد أزواج الطلاب الناجحين في آن واحد في اللاتينية واليونانية هو بالضرورة ، أقل من ، أو يساوي ، عدد أزواج الطلاب الناجحين في آن واحد في اللاتينية والصينية مضافاً إليهم عدد الأزواج الذين نجحوا باليونانية وفشلوا في الصينية . إن هذا القول ما هو إلا تدوين كلامي للمتراجحة العامة جدا المذكورة أعلاه ، ولكن بلغة نكاد نستعملها يومياً في حالة أفراد **منعزلين** ، متمايزين في المكان موضعياً ، وذلك مهما قد يوجد بينهم من روابط (عُبِّر عنها في هذا المثال بالتوأمية وبتطابق الأهلية) . بل إن هذا النوع من العلاقات ، عام جداً لدرجة أننا نستطيع اعتبار المتراجحات أعلاه تعبيراً مباشراً عن الموضعية (وقولنا مباشر يعني أنه دونما حاجة للاستعانة بفرضيات متممة أو خواص نوعية أخرى للمنظومات الذرية) . وهذه العلاقات تسمى علاقات بل .

لنعد الآن إلى حالة ميكانيك الكم الجدي الصرف ، الذي لايفرض شرط الموضعية ، والذي يمكننا في حال معرفة قيم زوايا مقياسي الاستقطاب بدقة ، من حساب القيم الوسطى المنتظرة لاستقطاب a في A واستقطاب b في B . إن ميكانيك الكم يتوقع وجود ترابط بين القياسات التي تتم بواسطة A وبواسطة B . ويعبر عن هذا الترابط ، مثلاً ، بالقيمة الوسطى لجداء الاستقطابين في A وفي B ، إذ تتوقف هذه القيمة الوسطى مباشرة على الزاوية التي يصنعها مقياس استقطاب مع آخر . فالحالة التي نحن بصددها هي حالة **ترابط قوي** .

وما علينا بعد ذلك إلا أن نقارن حدود الترابط القصوى التي اقتضاها شرط الموضعية ــ كما عبرت عنها متراجحات بل ــ مع قيم الترابط التي توقعها ميكانيك الكم ، حصراً ، لكل زوج من زوايا التوجيه . كأن نعوض مثلاً بهذه القيم في كل طرف من المتراجحة . ولقد ذكرنا أن قيم الترابط المتوقعة في الحالة الكمومية ، تتوقف على

الزوايا بين مقياسي الاستقطاب . ففي كل طرف من المتراجحة إذاً ، سيكون لدينا دالة نهائيـة (أوحدية) لهذه الزوايا ، فلو كانت المتغـيرات الخفية الموضعية من حيث قيمها الوسطى ، هي التي تؤدي إلى ميكانيك الكم ، لوجب ألا يكون هناك تناقض بين قيمة الارتباط الصارمة المحددة في حالة ميكانيك الكم ، وبين الحدود القصوى التي تنتج عن نظريات المتغيرات الخفية الموضعية (والحدود المقصودة هي تلك التي تعبر عنها متراجحة بل المذكورة أعلاه) . ولكن قد يصادف أن يكون هناك تناقض في بعض الحالات التي تؤخذ فيها أمثلة عددية بسيطة . فقد يكون الطرف الأيسر أكبر من الطرف الأيمن ، أي بعكس جهة المتراجحة ، فإذا وجد تناقض من هذا القبيل كان معناه أن ميكانيك الكم ونظريات المتغيرات الخفية الموضعية لاتؤدي إلى قيم الارتباط المتوسطة نفسها ، أو بمعنى آخر ، إن ميكـانك الكـم لايمكن أن يعتـبر محصـلة توزيعات وسطية لمتغيرات خفية . فالمتغيرات الخفية إذاً ، حين تحاصر بهذا الشكل ، قد تتراءى وتظهر من خلف وشاحها الكمومي المحترم ، فقد تكون أخبث مما نظن ، وقد تتمكن بهذا المزاح وهذه الدعابات الصغيرة أن تزيح « حجر سِنِمَّار » ، فيتحطم كل هذا البناء الذي شيِّد بالعرق والجهد .

* * *

ترى ، هـل وضـعنـا يدنـا أخـيراً على كعب أخيـل في ميكـانيك الكـم ؟ وهـل لهذا العمـلاق أقدام من فخـار ؟ إن سـلطتـه التي لم تهن في أصعب المعـارك ــ أمام الأشياء وواقعيتها ــ وشهرته التي أعلنت عنها صراحة جميع ميادين الفيزياء ، من الجسيم الضئيل حتى الحالة الصلبة للأجسام ، مروراً بالنواة والذرة والجزيء ، يمكن أن يأتي يوم نراها فيه وقد انهارت كلها بتجربة متواضعة من تجارب « الترابط عن بعد » ؟ تلك بالفعل هي المفارقة ، وهذا حجم الرهان في مشكلة اللحظة من قصتنا (ومع أن الخسارة لن تكون كاملة ، لأن النتائج التي حصل عليها ميكانيك الكم ستبقى بعد حدوث ذلك ، إلا أن هذه النتائج ستراجع عن الصف الأمامي ، وستزول هيبتها لتصبح مجرد تقريب لاأكثر) .

دعونـا نتـوقف هنـا هنيهــة كي نـلتقط أنفـاسـنـا بعـد أن أذهـلتنـا هذه

النكسة الجديرة بالخرافات ، ولنستعرض الماضي بسرعة . ففي بعض الحالات ، يمكن إجمالاً ، إيجاد تعارض بين ميكانيك الكم من جهة ، وبين أعم نظريات المتغيرات الخفية الممكنة من جهة أخرى . أو كذلك ، لايمكن لنظرية ذات متغيرات خفية محلية (أي موضعية) أن تؤدي إحصائياً إلى جميع تنبؤات ميكانيك الكم . فيمكن أن نختار — بل لابد أن نختار ، لأن الصراع لابد منه والبقاء للأصلح — فالهجوم كبير فعلاً . إذ لم تعد المجابهة بعد الآن مجرد حرب كلامية وجدال حول الآراء والتصورات ، وإنما هي معركة لأجل الأصلح . ولسنا بصدد **تجربة فكرية** فحسب ، بل بصدد تجربة واقعية أجريت — أو قيد الإجراء — تدون فيها ملاحظات حقيقية وقياسات . فليصمت الجميع إذاً ، لأن الواقع سيتكلم ، والنظرية الأصلح ستفوز .

بالفعل ، إن تجارب حقيقية ، مبنية على التجربة الفكرية التي وصفناها أعلاه ، أصبحت من حيث المبدأ ممكنة . ولكن لابد من تهيئة أدوات استقطاب وكشف تكون دقيقة جداً ، وتتمتع بفعالية ومردود حسابي مرتفع ، بل ومرتفع إلى حد يكفي لأن تكون أهلاً للمواجهة مع متراجحات « بل » . وعندئذ تقاس الارتباطات بمعدلات تعداد وصول الجسيمات a و b ، كلاً منها إلى مقياس استقطابه الموجه في اتجاه معين . وقد أمكن القيام بالفعل بمثل هذه التجارب منذ عام ١٩٧٠ ، ولكن بدراسة عدة منظومات ذرية أو جسيمية لابدراسة جزيء واحد . إذ إن حالة الجزيء الذي تتحدث عنه تجربة أ ب ر الفكرية تبدو أبسط وأيسر فهماً من الوجهة الفكرية ، أما من الوجهة العملية ، فإن الأيسر منها هو قياس الارتباطات عن بعد باستخدام طريقة الإرجاع المضاعف للذرات إلى سويتها من الطاقة وهي تطلق فوتونات ، أو بإفناء بوزيتون ($\gamma_1 \gamma_2 e^+ e^-$). ولقد أظهرت التجارب بمجملها أن متراجحات بل لاتتحقق بالارتباطات المقاسة ، بمعنى أن الارتباط الكمومي الصارم الذي يفترض وجوده بين القياسات الجارية على الجسيمات النهائية a,b ، لايمكن أن يلين إطلاقاً نتيجة تدخل متغيرات مهمتها بعث الحياة في الحتمية الموضعية . فاللاموضعية أو اللاانفصالية ، هي خاصة لاريب فيها في المنظومات الكمومية . وعلى هذا ، فإن العملاق (أي ميكانيك الكم) لم يكن هشاً

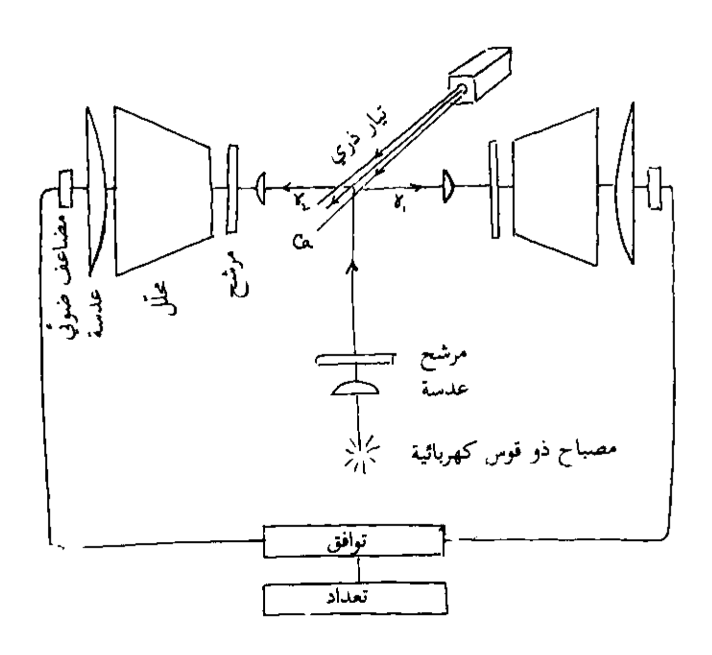
ضعيفاً كما قد يظن ، وكعبه ليس ككعب أخيل ، إلا أن العفاريت الخبيثة تتلبسه ولاسبيل إلى طردها منه .

غير أن هذه اللاموضعية تثير العديد من التساؤلات ، إذ كيف لنا أن نسلم بأن الجسيمين a و b ، مهما كانت المسافة بينهما بعيدة ، فإن من الممكن أن يظل أحدهما على علم بموضع هذا الآخر (أو باتجاه اسبينه)[1] ؟ وهنا قد يقول مؤيدو المتغيرات الخفية : ألا نستطيع أن نفترض أن المتغيرات الخبيثة لديها مئات الحيل : فما أن ندير ظهورنا ، حتى تستغل هذا الظرف وتتراسل فيما بينها ، تاركة قرون الغفلة تنبت على رؤوسنا ؟ أو بمعنى أوضح ، أليس من الجائز أن يكون هناك وقت كاف لأن تنتشر إشارة من نوع ما ، ولتكن ضوئية ، من الكاشف B إلى الكاشف A ، أو بالعكس ، في اللحظة التي وصل فيها إلى أحدهما الجسيم المكلف بإظهار العبور ؟ وعندئذ يمكن أن نتصور أن الإعلام عن حالة الجسيم الذي وصل الأول إلى كشافه ، قد انتقل إلى الكشاف الآخر قبل أن يصل إلى هذا جسيمه الخاص ، وبذلك يصبح هذا الكشاف على علم في أي حالة من السبين يوجد جسيمه ، ويصبح بالتالي قادراً على استقباله بالشكل الملائم ، أي قادراً على تثبيت وتأكيد الارتباط الصارم الذي نشاهده .

إن من واجبنا تجاه ذلك ، أن نتحرى الأمر لكي نطمئن ، وأن نبحث هل هذا الارتباط هو لعبة من ألاعيب المتغيرات الخفية . لذلك يجب أن نتخيل تجهيزات تجعل اللجوء إلى مثل هذه الحجج مستحيلاً . أي يجب أن نقوم بإجراء في التجهيزات يؤمن بشكل أكيد استقبال كل كشاف لجسيمه الخاص **قبل** أن تصل إليه أي إشارة واردة من الكشاف الآخر ، حتى ولو سارت بسرعة الضوء . وهذا أمر لايتطلب منا أكثر من أن نغير بسرعة ، وكيفما اتفق الأمر ، توجيه كل من كشافي الاستقطاب بدلاً من إبقائهما ثابتين دون أي تعديل لمدة طويلة ، كما في التجارب السابقة . لذلك نقول في مثل هذه الحالة ، إننا ندرس اللاموضعية من نوع المكان (الشكل ٢ ــ ٤) . أو بمعنى آخر : إن الارتباط ، إذا ثبت أنه يظل قائماً حتى بعد هذا الإجراء ، فعندئذ لايوجد أي

---

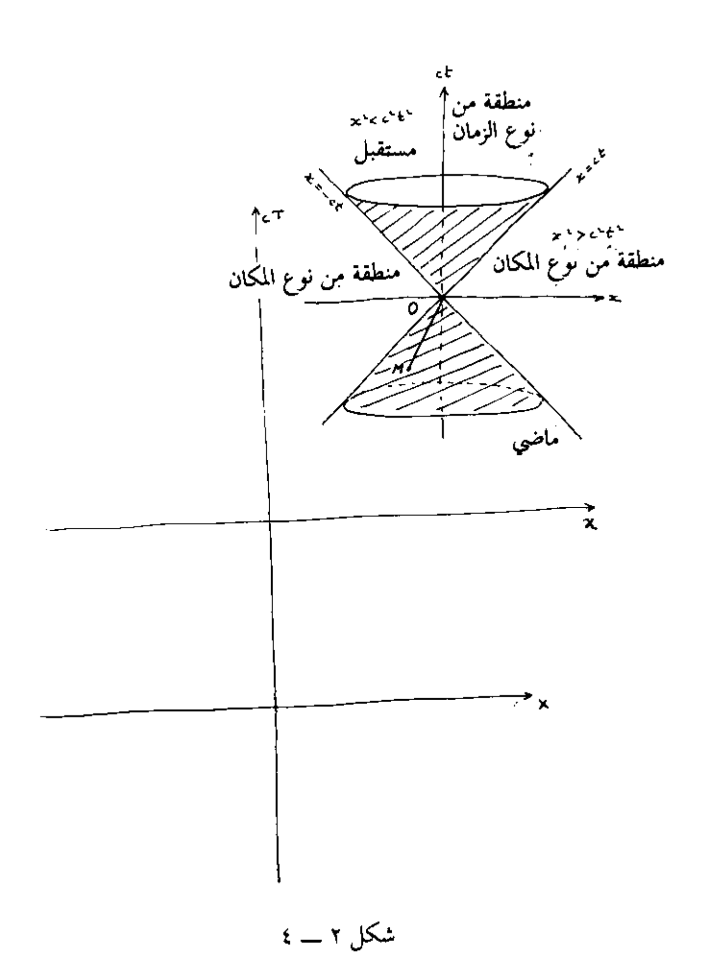
(١) أو حتى بما يجري عليه من قياسات وهذا هو الأهم (المترجم) .



شكل ٢ ـــ ٣

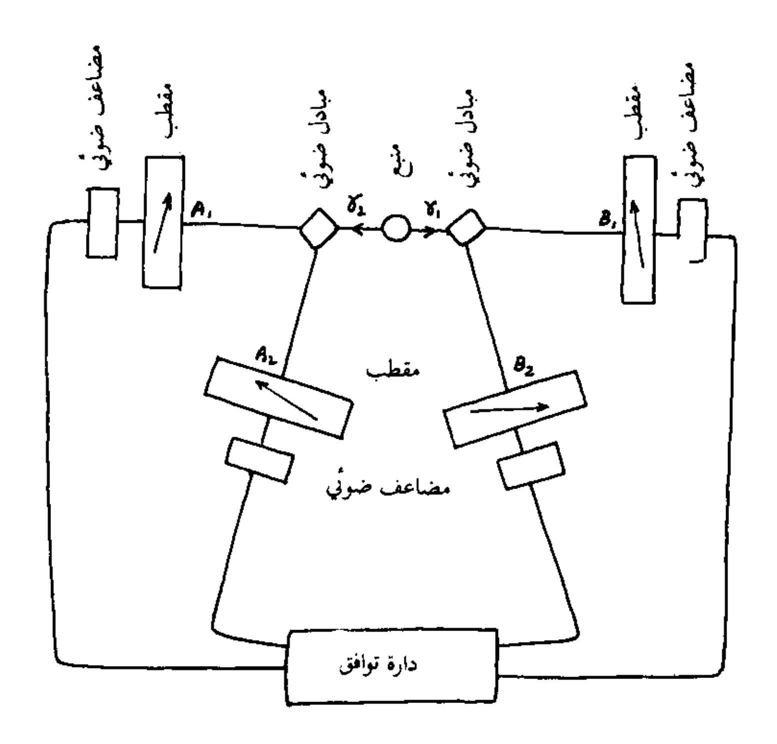
مبدأ تجارب الارتباط عن بعد : إن ذرة الكالسيوم المستثارة بضوء قوس كهربائية ، تعود إلى سويتها السابقة مطلقة فوتونين γ_1, γ_2 ، ويقوم مقياسا استقطاب بتحليل سببي هذين الفوتونين . إن معدل التعداد عند الخروج من دارة التلاقي ، يعطينا الارتباط عند التوجيهات النسبية للمقطبين .

تفسير سببي جائز بالمعنى النسبوي (ولكي يتضح الفرق ، نلاحظ أن التجارب السابقة ، كانت على العكس ، تجري في المنطقة ذات النوع الزمني من « مخروط الضوء » أي أنها في ظروف يمكن للعلاقة السببية (النسبوية) مبدئياً أن تتدخل فيها بين الحوادث الجارية في A وB . (انظر الشكل ٢ ـــ ٤) . وقد أعد لتحقيق الإجراء المطلوب ، (أي لتغيير توجيه الكشافين بسرعة) ، استخدام مبادل صوتي ـــ ضوئي فائق السرعة . وهذه تجربة ، على الرغم من أن إعدادها فائق الصعوبة ، إلا أن ألان أسبيه Alain Aspect الذي يعمل في إعدادها منذ عدة سنوات في جامعة أورسي ، أصبح على وشك التوصل إليها (الشكل ٢ ـــ ٥) ، فإذا أكدت نتائج تجاربه نتائج التجارب السابقة في مخالفتها للمتراجحات التي تمتاز بها الموضعية ، ثبت عندئذ بالدليل القاطع أن اللاانفصالية هي ، قطعاً ، سمة عامة



شكل ٢ ــ ٤

مخروط الضوء : لنفرض بقصد التبسيط أن المكان أصبح مستوياً عمودياً على مستوى الورقة وفق محور الفواصل x . ولنثبت على محور cT تعاقب اللحظات . عندئذ يمكن أن نمثل كل حادث بنقطة على الورقة ، إحداثياها X و cT (c سرعة الضوء في الفراغ). إن حادثاً ما وليكن O ، لايمكن أن يرتبط بطريقة سببية (أي بانتقال إشارة أو تأثير فيزيائي ينتقل بسرعة تساوي على الأكثر سرعة الضوء) بحادث آخر ، M ، إلا إذا كان الشعاع $\overrightarrow{MO}$ داخل مخروط الضوء المعرف بالمعادلة $x^2 = c^2 t^2$ أو عليه . (ولكي تكون M سبب O يجب أن تكون إضافة إلى ذلك في قسم « الماضي » من مخروط الضوء) . ندعو المنطقة $x^2 < c^2 t^2$ منطقة « من نوع الزمان » . وأما المنطقة $x^2 > c^2 t^2$ منطقة « من نوع المكان » . لأن أياً من نقاطها لايمكن أن يتبادل علاقة سببية مع O .



شكل ٢ ــ ٥

مخطط مبدئي لتجربة « أسبيه » :بدلاً من أن نظل على التوجيهين الثابتين للمقطبين B_1، A_1، فإننا نستبدل بهما ، وكيفما اتفق الأمر المقطبين B_2، A_2 ، ونستعمل لذلك مبادلات ضوئية (مدة المبادلة ٢٠ نانو ثانية) ، بينما تفصل بين المقطبين مسافة لايمكن لأي إشارة ضوئية أن تجتازها في المدة المهيأة (منطقة « من نوع المكان ») (النانو ثانية هي جزء من مليار من الثانية) .

في جميع المنظومات الكمومية[١] . أما إذا لم تؤكدها ، فهذا يعني أن الموضعية مصانة ، وأن الترابط الذي نشاهده بين الجسيمات في التجارب السابقة ينشأ عن تأثير سببي بينها . ولكن معظم الفيزيائيين يعتقدون أن اللاانفصالية الكمومية هي سمة أو خاصة يجب أخذها بعد الآن بعين الاعتبار . كما يتوقعون لتجارب « أسبيه » نتائج مؤيدة لميكانيك الكم ، لأنه يصعب الاعتقاد على كل حال بأن يكون الفساد الناجم عن المتغيرات الخفية هو على

(١) لقد أجريت التجربة ، وأتت مؤكدة لميكانيك الكم . راجع مجلة العلوم .

هذه الدرجة من الاشتداد ، أضف إلى ذلك أن طبيعة هذه الإشارة المفترضة لابد أن تكون غريبة . ولكن الحيطة كانت ضرورية ، ولذلك كان لابد أن نفترض أن خصمنا أكثر دهاء مما قد يكون . فيجب أن نسلم بعد الآن بأن المتغيرات الخفية الموضعية ستختفي من الوجود بعد ما سخرت آخر مرة من ميكانيك الكم ، وبأن اللاانفصالية أو اللاموضعية ستظل قائمة ولن تزول. فعلينا بعد الآن، كما قال جون بل يوماً، « أن نعيش مع اللاانفصالية » ، شئنا هذا أم أبينا .

ولقد قدمت للاانفصالية ، صيغ عديدة ، اعتبرت كلها متكافئة ، ولكننا سنكتفي بذكر ثلاث منها ، أولاها ، وهي أكثرها إيجازاً : **لايمكن لمنظومة كمومية من الجسيمات المترابطة أن تكون قابلة للانفصال موضعياً** ، وثانيتهما : **لايمكن لجسمين سبق أن أثر كل منهما في الآخر أن يكونا قابلين للفصل موضعياً ، أي ، أن معرفة أحد الجسيمين (أو إجراء قياس عليه) يؤثر في الآخر دون أن يتم تداول إعلام ناجم عن فعل فيزيائي** . وقد تستكمل فرضية اللاانفصالية هذه بتعميمها على المادة بمجموعها ، لأن كل جسيم ، هو بطبيعته نفسها ، يتبادل التأثير مع جسيم آخر . فهذا التأثير المتبادل ، الذي مضى أو الذي سيأتي ، ينتج عنه الترابط . فما المانع أن نتحدث عن كون ذي « كلية لاتنفصم » (أو كما عبر دافيد بوهم بالانجليزية **unbroken wholeness**) أما ما نراه من فصل جائز في الوقائع بين الجسيمات ، فينجم عندئذ عن تقريبنا للأمور عندما نأخذ بعين الاعتبار منظومة جزئية بشكل منعزل . وهناك صيغة ثالثة مشذبة (علمية بحتة) ، شبيهة بالألغاز ، تفرض ببساطة **أنه لايمكن لمنظومة كمومية يمثلها متجه حالة**[١] **من النوع الثاني ، أو خليط غير خاص** ، (وهذه بحسب شكلية ميكانيكية الكم ، حالة دالة موجية ψ لمجموعة الذرتين a و b) ، **أن تنشطر إلى منظومتين جزئيتين ، يمثل كلاً منهما متجه حالة من النوع الأول** (الذي يقال له خاص propre) ، وهذا ما قد يكون حال الدوال الموجية[٢] ψ_b, ψ_a, ψ_i حين نأخذ كلاً منها بمعزل عن الأخرى . إن هذه

(١) يستعمل حالياً ، وبوجه عام ، التعبير **متجه حالة** المكافئ لعبارة **دالة موجة** .

(٢) يرجع الفضل في إيضاح الخواص الكمومية للخلائط الخاصة واللاخاصة بدلالة متجهات الحالة من النوع الأول أو الثاني إلى ب . ديسبانيان . مثلاً في كتابه **Conceptions de la physique contemporaine** . **(Paris, Hermann 1966)**

الدعــوى ، هي ، من وجهـــة التــعبـــير العـــلمـــي ، أصـــدق الدعـــاوي التي تعبر عن اللاانفصـــاليـة . وذلك نظراً إلى أنها لاتستعين إلا باعتبارات من شكلية ميكـانيك الكـم دون أن تضيف عنـاصر أو أفكـاراً خارجيـة ، إذ إن إضـافة الأفكار الخارجية ، غالباً ما تكون مصدراً لسوء تفاهم ، لأن ميكانيك الكم لايمكن التعبير عنه بصدق إلا بلغة دعاوية ، إذ إن كل طريقة للتعبير عنه بلغة أخرى غير لغته تلك ، تؤدي إلى فقده لقوته واتساقه . والحقيقة إن الصعوبة تكمن هنا ، ذلك أن المفاهيم المستعملة في ميكـانيك الكـم لاتتطابق مع مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية (أو مع اللغة الدارجة) إلا عندما نقبل ذلك بتقريب ، وهذا التقريب بالنسبة لأناس ، أمر لامفر منه إذا ما أرادوا أن يفهموا عن ماذا نتكلم . بينما كل تقريب بالنسبة لآخرين ، يجب أن يؤخذ كما هو مجرد تقريب ، ولابد بالتالي من الحيطة والحذر . بمعنى أنه لايمكن أن نستعمل هذا الأسلوب دون أن نوضح في الوقت نفسه حدود تطبيقه . وهذه بالتحديد هي الصعوبة التي تعترضنا دائماً كلما درسنا الخواص النوعية في المنظومات الكمومية ، لذلك علينا أن نستعيد دائماً ذكرى المَرْكبة التي تغوص بنا في عالم الصغائر في الفصل السابق .

وهنـا نتســاءل : مـا الذي حمـلتـه إلينـا أخيراً تجارب الترابط عن بعـد بالنسبـة إلى ما كنـا نعرفه ســابقـاً (أي في أيام أينشتين وبوهر) عن ميكانيك الكم والمنظومات التي يدرسها ؟ ذلكم هو السؤال الذي قد يراودنا . لأن اللاانفصـالية ، كما رأينـا ، متضمنـة أصـــلاً في الشكلية التي طرحت على الســاحة في مطلع الثلاثينيات . (ولاشيء جديد يبدو لنا في هذه التجارب) .

إن هـذه التجــارب ، بـاستعمــالها للمســافـات الكبـيرة ، كانت من الوجهة الفيزيائية ، رائزاً لخاصة كمومية هامة هي اللاانفصالية . وكان ميكانيك الكم إلى حين إجرائها ينسب إلى تجارب تخص المسافات الميكروية (المجهرية) هذا إذا استثنينا بعض الظواهر الماكروية (الجهرية) . أضف إلى ذلك ــ ودائماً من الوجهة الفيزيائية ــ برهنت هذه التجارب أن النظريات ذات المتغيرات الخفية الموضعية ، ليست هي الطريقة السليمة التي يجب اتباعها لتجديد أو تعميق ميكانيك الكم ، وأنه من العبث ، بل ومن الخطأ بعد

الآن ، أن نبحث في هذا الاتجاه عن حتمية دقيقة صارمة . أما فيا عدا ذلك فلم تقدم هذه التجارب مادة جديدة ، لالشكلية ميكانيك الكم ، ولالتأويله .

على أن لها أهمية أساسية جداً ، بل يمكن أن نعقد هنا مقارنة بين تجربة « أسبيه » حول الترابط عن بعد في المنظومات الجزئية الكمومية ، وبين تجربة مايكلسون ومورلي المتعلقة بإمكان كشف حركة الأرض بالنسبة للأثير (إذا وجد) أو لمكان مطلق . إذ نفت هذه الأخيرة نهائياً ما يفترض أنه ريح أثيرية ، واتضح أنها الامتحان التجريبي المقنع لفكرة المكان والزمان النسبيين ، التي طورتها نسبية أينشتين الخاصة . ولاتختلف عن ذلك تجربة أسبيه ، فقد كانت المحك الذي لايمكن دحضه نهائياً للاانفصالية (أو اللاموضعية) الكمومية . ويمكن أن نضيف إلى هذه الخاصة المشتركة ، بأن هذين الرائزين (أو المحكين) على الرغم من اتضاح أنهما أساسيان ، إلا أنهما لم يلعبا ، لاهذا ، ولاذاك ، دوراً في إعداد النظرية التي امتحنها . كل ما في الأمر أن الحقيقة التجريبية ، أشير إليها في حالة النظرية النسبية الخاصة . أما في حالة ميكانيك الكم ، فإن مفهوم اللاانفصالية قد بدأ التفكير فيه اعتماداً على الصيغة الشكلية ، وقبل الحدث التجريبي بزمن ليس بالقليل . وهذان الاختباران الحاسمان ، كانا ، وسيكونان دائماً ، الأول كالثاني ، مناسبة لاستئناف العمل والتفكير فيهما بشكل دوري ، وبطرق أكثر تشذيباً وتدقيقاً (إذ يتوقع أن تستعاد تجربة أسبيه عدة مرات في المستقبل ، وبعد إجراء التعديلات عليها ، ولكن مع بقاء المبدأ نفسه) .

فإذا سلمنا بأن الأمور على مابيناه ، وبأن التجارب المقبلة لن تشكك في ما قيل ، فإننا سنجد أمامنا فكرة ــ هي اللاانفصالية ــ ليس لها مثيل كلاسيكي ، وبأنها ستصدم الإحساس الفطري الشائع الذي اعتاد المفاهيم المألوفة لانفصال الأشياء محلياً (ولكن بانيش هوفمان ، بيّن في الفصل الأخير من القسم الأول ، كيف تؤدي المفاهيم الكمومية إلى نقد جذري لفكرة المكان والمحلية أو الموضعية) . وتشير التجارب حول اللاانفصالية ، إلى أن لافائدة ترجى من محاولة إذابة هذا المفهوم في آليات فيزيائية خلفية مستترة (مضمرة) . ونظراً إلى أن كل شيء يتعلق بالتساؤل عن الانفصالية ، من وجهة فيزيائية ، قد قيل ، فكل سؤال بعد الآن عن اللاانفصالية ،

سيكون منوطاً بالتوضيح الإيبيستيمولوجي المتعلق « بأسس » ميكانيك الكم . وهنا نجد أنفسنا قد وصلنا ، وإلى حد ما ، إلى « تأويلات » ميكانيك الكم المختلفة : فهناك من جهة ، الوضعيون والإجرائيون في خط مدرسة كوبنهاغن ـــ مع ما بينهم من تباين وتنوع وألوان يصعب هنا تعدادها . وهناك من جهة أخرى ، الواقعيون ، وهؤلاء أيضاً ، كان علينا أن نميز من بينهم تنوعات مختلفة يصل التباين بين فئاتها إلى درجة كبيرة[1] . ولما كان كتابنا هذا ليس عملاً فلسفياً ، لذلك لن نناقش هذه الأمور بالتفصيل على هذه الصفحات . إلا أننا سنعود إلى ملاقاتها مع ذلك في أثناء رحلتنا القريبة إلى ميدان القياس .

على أن لدينا كلمة نقولها ختاماً لهذا الحديث عن اللاانفصالية . فالوضعية le positivisme كما يبدو استوعبتها جيداً ، وقد قلنا ذلك ونعيده : إن الشيء الخاضع للملاحظة يتأثر بظروفها التجريبية ، فما موقف الواقعية ؟ هل تزداد حالتها سوءاً ؟ ألم يعد لنا الحق في الحديث عن **الشيء الواقعي** بمعزل عن الملاحظ ؟ لاأعتقد من جهتي أن هذا التصور المعقول (أي الواقعية) الذي يغدو العلم بدونه لاشيء سوى قِدْرٍ غريب يُطهى فيه الساحر مع أعشابه ـــ ولاعجب في ذلك ، ألم يبلغ الأمر بأحدهم أن قال **إنها وصفات ناجحة** ـــ أقول ، لاأعتقد أن هذا التصور المعقول عن الواقعية ، بحاجة إلى كل هذا الدواء المرير لكي يهضم اللاانفصالية . بل يكفيه أن يلاحظ أن أفكار ميكانيك الكم ، هي قطعاً ذات طبيعة « لاموضعية » ، وعندئذ يسلم بأن الأشياء التي يدرسها موجودة في جميع الأحوال ، ولاحاجة في ذلك للاستناد إلى « تأثيرات آنية (أو فورية) » مهمتها نقل الإعلام من a إلى b ـــ فهذه التأثيرات ستكون ، بعد كل الذي عرفناه ، تأثيرات غير فيزيائية ـــ بل إن الرغبة في أن نأخذ ، وبأي ثمن ، كل ذرة منبثقة عن الجزيء المشطور ، على حدة ، وفي أن ندرسها بمعزل عن الأخرى ، هي رغبة لن تكون ضرورية إلا إذا علقنا على مفهوم الفصل المكاني (أو الموضعي) للأشياء الفيزيائية ، أهمية كبيرة . اي إذا حافظنا بإصرار على الاعتقاد بهذه الأفكار التي تأتينا من الفيزياء الكلاسيكية ومن

---

(١) يمكن أن نضع وجهة النظر التي اقترحها حديثاً ديسبانيات عند الحد الفاصل بين الطرفين : الوضعيين والواقعين .

حدسنا العملي الناتج عن التجربة المألوفة اليومية بوجه خاص . ولكن اللاانفصالية هنا ، ليست ، علاوة على ذلك ، هي وحدها موضع الشك والريبة ، بل هناك مفاهيم أخرى في نظرية الكم تتحدى الخيال وتتحدى أيضاً كل محاولة لإيجاد صورة لها في الفيزياء الكلاسيكية . من ذلك ، عدم تمايز الجسيمات المتماثلة (الذي كان موضع حديث مطول في القسم الأول) ، والذي ينشأ عنه في حالة منظومات الجسيمات سلوك لايمكن فهمه أو استيعابه بلغة الحركات المألوفة التي هي من قبيل حركة الكريات مثلاً . فيجب أن نعتاد على ذلك . إن الأشياء في هذه الأعماق التي تستكشفها غواصتنا تطالب عقلنا ـــ الذي هو امتداد لعيوننا ـــ بقدرة أخرى على المطابقة غير مطابقة عيوننا ، وبمفاهيم جديدة مخالفة جذرياً لما ألفناه . إن ضوء مشعلنا ، أو شكل ملقطنا الآلي ، الخاصين بالتقاط هذه المفاهيم عن طريق الملاحظة أو القياس ، هما تلك الشكلية الرياضية التي نجح فيزيائيو الكم في بنائها .

٣ ــ حول السببية والقياس
موت الآنسة سببية للمرة الثالثة

يكــاد القــلق الروحي الذي تسببــه بــلاد الكـم لرائدها المقيم ، بأسئـلتهـا المحيرة ، يداني بشدته قلق المارة الذين كانوا يتعرضون في الماضي السحيق لأسئلة أبي الهول وألغازه .ولكن رواد نظرية الكم الأوائل نجحوا والحق يقال، كسلفهم أوديب[١]، في حل كثير من هذه الألغاز . وبقيت المشكلة الآن : هل حلوها كلها وأصبحت بلاد الكم مكشوفة أمامهم ، خالية من الأسرار ، مثلما انكشف سر أبي الهول وارتمى إلى الهاوية ؟ هذا ما تختلف حوله آراء الرواد اليوم . وذلك أن هناك لغزين كبيرين على الأقل لم يحلا بعد على ما يبدو ، ولا أدل على ضخـامة هذين اللغزين من دهشـة رائدنا المقيم أمام صيـاغتهمـا الغريبة ، وأمام الإجابات الأغرب التي قدمها المارة حلاً لهما ، والتي كانت عبقرية فعلاً (لاسيما أن هؤلاء المارة هم مسافرون مثل رائدنا المقيم ، لاتربطهم بالكم أي ألفة نشأت منذ الولادة) . وهذان اللغزان هما السببية والقياس ، ولكنهما ، كيفما نظر إليهما ، فإنهما في الحقيقة ليسا سوى لغز واحد كما سنرى بعد حين .

فـأمـا عن اللغـز الأول (السببيــة) ، فقـد سمعنــا عنــه ، ورأينــا كيف أعلن عن بطلان السببية الكلاسيكية ، وكيف ألقيت دون خجل في زاوية النسيان ، حتى أن الانتقـال من السببية الكلاسيكية إلى السببية بعامة ، لم يحتج إلا إلى خطوة واحدة خفيفة جداً ، أمكن تخطيها بسرعة وطمأنينة ، ولم يتعد الأمر أكثر من قولهم إن ميكانيك

(١) تروي الأسطورة أن أبا الهول كان يطرح الألغاز على المارة ، فإن لم يعرفوا حلها التهمهم : ولكن أوديب الذي طرح عليه أبو الهول السؤال التالي : ما الحيوان الذي يمشي على أربع في صغره وعلى اثنتين في رشده ، وعلى ثلاث في كبره ، استطاع الإجابة ، وقال هو الإنسان . وعندئذ هوى أبو الهول إلى قاع البحر (المترجم) .

الكم ينفي السببية . ولاعجب ، أفليس من يقول بالمصادفة يقول ايضاً بغياب السببية ؟ ثم عندما لاتتوقع النظرية سوى الاحتمال بالنسبة لحادث قد يحدث ، أو بمعنى آخر ، لاتتوقع سوى نتائج عدة ممكنة لسبب واحد ، هذه النظرية ، ألا يحق لنا أن نقول إنها لاسببية ؟ أليس الواقع — إن وجد حقاً واقع — يبدو كأنه يريد أن يخاتلنا بألاعيبه — فلا يجيب إلا على هواه ومزاجه الطليق ، وحسب أهوائه وما يعشق ؟ بل لقد بلغ الأمر ببعض العلماء ، كما ذكرنا ، أن نادوا بأن عالم ما وراء الكم بحد ذاته ، لايمثل سوى العماء والفوضى ، لأن الحادث فيه لايؤدي إلى حادث آخر وحيد . فلا يمكننا بالتالي (بالنسبة للمستقبل) إلا أن نتحدث عن إمكانية بالقوة ، وليست مؤكدة الوقوع بالفعل . وهذا طبعاً شهادة بوفاة السببية .

غير أننا نستطيع الاعتراض على هذه الشهادة في الحقيقة بأن المتوفاة لم تمت كلياً . لأن فوضى العلاقات بين الظواهر ليست كلية شاملة إلى هذه الدرجة ، درجة وفاة السببية ، فمجموعة الإمكانيات التي يمكن أن تأخذها ظاهرة ناتجة عن سبب معين ، لاتسلك في ظهورها ، في الحقيقة ، سلوكاً كله فوضى ، بل سلوكاً يسير على نهج محكوم بقوانين صارمة . لأن المصادفة هي أيضاً لها قوانين صلبة ، **هي قوانين المصادفة** ، فلا تتوزع تكرارات الإمكانيات كيفما اتفق الأمر ، بل تتوزع توزعاً منتظماً لايدع مجالاً للشذوذ أبداً . إذ من المعروف أن توزيع النتائج التي نحصل عليها من تكرار رمي حجري النزد ، أو سحب كرات من كيس ، عدداً متتالياً من المرات ، هو توزيع يغدو ، إذا كان عدد مرات التكرار كبيراً جداً ، توزيعاً منتظماً يسير وفق دساتير رياضية دقيقة . ولاتشذ عن ذلك طبعاً الظواهر العشوائية الناشئة عن طبيعة كمومية . بالفعل : دعونا نتخيل حزمة من الفوتونات أو الإلكترونات لها صفات وخواص معينة تماماً (كتوازي المنحى وقيمة الطاقة والتواتر) . ولتكن ملزمة باجتياز حاجز صنع فيه ثقبان مثلاً ، ليكون معداً للتداخل ، ثم تسقط هذه الحزمة أخيراً على شاشة مغطاة بفيلم فوتوغرافي أو بمادة براقة . (وقد ورد وصف هذه التجربة في القسم الأول عن انعراج الجسيمات الكمومية عند مرورها بـ « ثقبي يونغ » ، ودرست هناك أيضاً)[1] . وقد ثبت

(١) انظر ص ١٧٦ ، ... ، ١٨١ .

لدينا فيها ما يقول به ميكانيك الكم من أن الجسيمات تمر كيفما اتفق الأمر ، بالثقب العلوي أو السفلي ، وأنها تصل إلى الشاشة بمحض المصادفة . فلنتصور أن الحزمة قد اختزلت شدتها حتى لم يبقَ منها في كل سقوط سوى جسيم واحد ، ولنرَ كيف يصطدم هذا الجسيم بالشاشة ،بفحص الأثر الذي يخلفه على حبيبة المستحلب الصغيرة . إن ظروف كل جسيم ــ منحاه وطاقته ــ مع أنها هي نفسها ، إلا أن ما يحدث ، هو أن الآثار المتخلفة لن تكون متماثلة تماماً ، لأن مرور الجسيم مرتين متتاليتين لايعني أنه سيصل إلى المكان نفسه في المرتين . فلنتصور أن التجربة أعيدت عدداً كبيراً من المرات بجسيم واحد (الشكل ٢ ــ ٦) . إن عدد الحبيبات المتأثرة في طبقة المستحلب ، بسبب اصطدامها بالإلكترونات الساقطة على الشاشة ، ستمثل شكل تداخل ، بمعنى أننا سنلاحظ إجمالاً ، قانون الانعراج بدقة (أهداب متناوبة : سوداء وبيضاء) . وهذه النتيجة كنا سنحصل عليها ، هي نفسها ، فيما لو أجرينا التجربة بعدد كبير جداً من الجسيمات بدلاً من تكرار التجربة بجسيم واحد . فنحن هنا إذاً ، أمام قانون إحصائي أو احتمالي (لايختلف بشيء عن غيره) . وبما أننا نستطيع الرجوع هنا من مجموعة الآثار (أو المفعولات) ــ أي صورة الانعراج ــ إلى تعريف حزمة جسيمات ابتدائية ، أي إلى منحاها وطاقتها ، وبالتالي إلى السبب ، فلماذا لانقر هنا أيضاً بأن من الممكن أن نتحدث عن سببية ، وإنما سببية بمعنى خاص ، وهو أنها سببية إحصائية أو احتمالية . غير أننا بذلك ، نكون قد عرفنا السببية تعريفاً جديداً ربطناه بمكانة الإحصاء والاحتمال بمدلولها الكمومي . وهكذا نرى أن الإحصاءات والاحتمالات ، بعد أن تسربت إلى الفيزياء من مسارب متعددة ، وبخاصة من الميكانيك الإحصائي ومن قوانين تفكك الأجسام المشعة ، أصبحت ، فعلاً ، جزءاً مكملاً من صياغة النظرية الكمومية . وقد بلغ هذا التسرب أقصاه مع تأويل ماكس بورن الاحتمالي لدالة الموجة[١] ..

ويدعم وجهة النظر هذه أيضاً ما قيل سابقاً عن عدم تمايز الجسيمات . فحين نقول إن لجسيم كمومي احتمالاً قدره كذا لأن يكون في حالة معينة ،

---

(١) انظر ص ١٥٤ ، ١٥٥ وكذلك ١٦٩ ــ ١٧٦ وأيضاً ١٨٥ ــ ١٨٧ .

فإن هذا القول يجب ألا يعد تعبيراً عن جهلنا ، بل تعبيراً عن خاصة في الجسيم . وهذا **التأويل الموضوعي** للاحتمالات ، الذي تقدم به ك . بوبر Karl Popper وف . فوك Vladimir Fock وم . بونج Mario Bunge وآخرون ، يرافقه غالباً تمييز بين الاحتمال والإحصاء . فبينما يمكن للأول أن يكون صفة واقعية لجسيم بمفرده ، فإن الثاني لايمكن أن ينسب إلا إلى مجموعات من الجسيمات .

وهكذا نكون قد أدخلنا صفة جديدة تطلق على الجسيمات ، وعرفنا السببية تعريفاً جديداً ذا طبيعة احتمالية صرفة ، وجعلناها سببية عليها علائم التراخي بالنسبة إلى السببية ذات التحديد الصارم الفريد ، أو سببية مرنة إلى حد ما ، وهذا أمر مؤكد ، ولكن هذا التغيير سواء أكان مستساغاً أم لا ، فإنه لايمنع ، على الرغم من هذه المرونة ، من أن تترتب الجسيمات بعد تجوالها الشارد ، على شكل قطيع مرتب تماماً . ذلك أنها لم تكن تشرد بالقدر الذي نتصوره . لذلك ، لابد أن تدعو طبيعة هذا الشرود المنتظم إلى التساؤل ، حتى ليمكن أن نعتبره ملْزماً بتعريف جديد للسببية الفيزيائية . أو على العكس ، قد نزعم أن هذا الشرود نشأ بسبب الطريقة التي ننظر بها لاغير ، وأنه ليس سوى نتيجة لاختيارنا السيئ للمتغير أو للظاهرة ، وأنه إذا ما غيرنا وجهة نظرنا — أو مفهومنا مثلاً — أمكننا أن نجد منفذاً إلى وحدانية السبب والنتيجة (إن هذا الموقف مثل ذاك ، سيحيلنا إلى مشكلة الرؤية في غواصة الأعماق ، أي أننا ننظر إلى عالم مختلف عن عالمنا ولكن بعيون أعدت لعالمنا) . ومهما يكن من أمر ، فإن السببية ستعتبر في النتيجة بحكم المصانة ، سواء أكانت مرنة أم صلبة قاسية ، حتى ولو كان ذلك بأسلوب معدل ، فالسببية تسترد مكانتها ، والميتة تستعيد الحياة .

ومع ذلك ، فإن قصة السببية في بلاد الكم قصة حزينة مؤلمة ، فهي ما تكاد تبعث من جديد حتى نراها تموت ثانية . ولقد شاهدنا ذلك مراراً وليس فيه ما يفاجئنا . فقد وصلنا في الفصل السابق مع الثلاثي أ ب ر أولاً ، ثم مع الدكتور بل — على الرغم منهم — إلى استنتاج ملزم من هذا النوع . ولقد أصروا على أن السببية يجب أن تفهم بشكلها الصافي الذي تضفيه عليه النسبية ، وإلا لن تكون سببية . فمثلاً ، إذا

أخذنا جسمين بينهما مسافة[1] من النوع الذي يقال له مكاني ، أي مسافة يستحيل على أي إشارة فيزيائية أن تجتازها بسرعة لاتتجاوز سرعة الضوء ، فإنهما مع ذلك يتحاوران خلســة رغم كل هذه التدابير . فبقاؤهما على هذه الحال من تبادل المعلومات هو بمثابة سفك لدماء السببية . فالأمور إذاً ليست على ما يرام في بلاد الكم ، وأولئك الذين سبق لهم أن شيعوها بهدوء ، يعودون اليوم للاحتفال بموتها ثانية . بل إن حدث موتها في هذه المرة يستحق أن يكون عنواناً ضخماً لصحف المساء (لأنه خيب آمال علماء كبار مثل أينشتين ودوبروي وبوهم ..) . لذلك لم يكتفِ كثيرون وهم في غمرة حماسهم بأن يروها مدثرة في أكفانها ، بل أرادوها أن تحرق حية كأي ساحرة عجوز أخنى عليها الزمن . وراحوا يقررون بصخب عظيم بأن المفعولات يمكن أن تسبق الأسباب ، وأعلنوا أمام الملأ ما هي مملكـة اللامعقول وما هو الصعود في مجرى الزمن . وأما الآخرون ، ممن لازالوا يبجلون السببية ، فمنهم من نادى من خوفه بالهرب من هذه الميادين العدوانية ، وراح يبحث عن الحقيقة في غير هذا المجال ، ومنهم آخرون كانوا متفائلين ، فهدؤوا من روعهم بقولهم : إن السببية لم تمت ، وليس هذا سوى تنكر لخداع الخصم ، فالفتاة الشابة (السببية) ستعود أكثر حيوية مما كانت عليه ، وستظهر حيث لم يخطر لأحد أن يبحث عنها ، وستشير بمنطق صريح أنه لايمكن التماسها دون تحديد العناصر التي يفترض أن تكون متوافرة لها ، أي أشياء مفصولة موضعياً ، إذ توضح الأمر بقولها : كيف تتحدثون عن انتقال سببي لإشارة ما بين شيئين مفصولين إذا لم تكونوا قادرين على التمحيص في هذين الشيئين وتحديدهما ؟ فالمشكلة ليست مشكلة السببية ، بل مشكلة تعريف مثل هذه « الأشياء المنفصلة » . لأن أشياء من هذا القبيل لاوجود لها في بلاد الكم ، وهذا على الأقل بالنسبة لما ورد في المثال الذي ذكر . فالموالون للسببية بإمكانهم أن يهنؤوا : لقد ماتت الموضعية إذاً ، فلتحيا السببية (ولكنها طبعاً ، سببية محوَّرة أيضاً) .

---

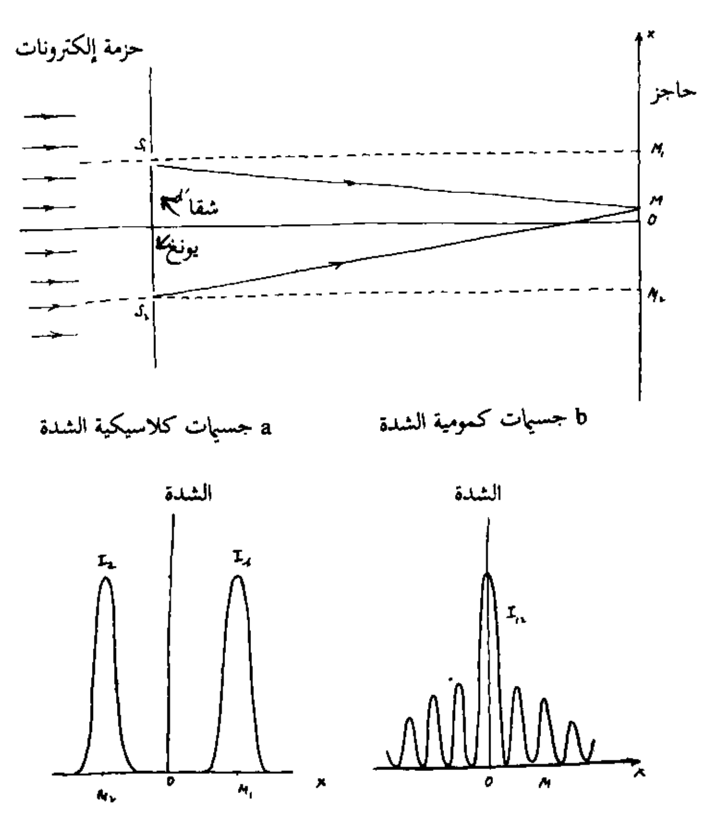
(١) المقصود هنا « المسافة » المعرفة في الزمكان ، وهذه المسافة هي من النوع « مكان » إذا كانت مركبتها المكانية أكبر من مركبتها الزمنية . إذ إن القسم الزمني يقابل المسافة العظمى التي تجتازها إشارة فيزيائية في الزمن المرعي (أنظر الشكل ٢ ــ ٤) . أو بشكل آخر : إن المسافة من النوع المكاني هي المسافة بين حادثين تفصل بينهما مدة لاتكفي للضوء لكي يجتاز المسافة المكانية البحتة التي تفصل بينهما .

ولكن ألا ترون معي أن علينا أن نذعن أخيراً ، وأن نهيئ أنفسنا لمأتم ثالث ، مفرح بالنسبة للبعض ، محزن بالنسبة لآخرين ، ولكنه على كل حال مأتم نهائي ، لأن الآنسة سببية ستموت في هذه المرة ميتة مفجعة كأي بطلة من بطلات الغرب عند سفوح المنحدرات الخطرة لعمليات القياس ؟ بل لقد ماتت فعلاً وأعلن عن نبأ وفاتها على الملأ « بالطبل والمزمار » . ونظراً لخطورة هذا الحدث ، فهو جدير بأن يروى بشيء من التفصيل ، إذ يهمنا أن نعرف : هل ستختفي السببية جسماً وروحاً في هذه الحكاية الجديدة ؟ أم سيعثر على جثمانها مرة أخرى ؟

إن شكلية ميكانيك الكم ــ كما ذكر في القسم الأول ، وكما وضح مؤرخ الكم م . جامر Max Jammer في أحد مؤلفاته ــ كانت قد سبقت زمنياً تأويلها[١] . ولم تؤخذ مشكلة القياس مأخذ الجد إلا فيما بعد ، حين ظهر أنها مشكلة مركزية في هذه النظرية . ولم يحسب حسابها ، في حقيقة الأمر ، إلا بعد أن أصبحت النظرية واثقة من نفسها تقريباً . ذلك أن القياس ، لم يبدُ عليه حتى الآن ، وفي جميع ميادين الفيزياء ، أنه مشكلة ، أو على الأقل مشكلة أساسية ، إلا في نظرية الكم . لأن القياس لايعدو كونه مسألة عملية تنحصر إشكاليتها في السؤال التالي : كيف يجب أن نتصرف على النحو الأمثل لكي تبلغ قياسات ظاهرةٍ معينة ، تلك الدقة المميزة التي تختبر صحة النظريات أو النماذج النظرية المرعية ؟ وكان الاعتقاد السائد ، هو أن هناك دائماً إمكانية لإتقان التجارب وإجراء التصحيحات المطلوبة ، بحيث نستطيع أن نتجنب ما يمكن أن يطرأ من انحرافات تعزى إلى طريقة الملاحظة . ومن هذه الانحرافات مثلاً ، خطأ زاوية اختلاف النظر الذي نرتكبه عند قراءة مسطرة مدرجة أو وضع إبرة أمام لوحة مدرجة ، أو زوغانات الآلات البصرية ، أو مفعول الانعراج في الجو وحركة الأرض عند القيام بأرصاد قليلة إلخ . فهذه الأخطاء المتعارف عليها ، يمكن حسابها تماماً . كما يمكن أن نبين حدود الدقة التي يمكن أن تبلغها القياسات الفلكية مثلاً التي يمكن أن يبلغها الفلك بالتحديد ، أو بشكل أفضل تماماً . كما يمكن أن نعين حدود الدقة التي يمكن أن تبلغها

---

(١) ذلك أن التأويل الاحتمالي لدالة الموجة بأنها دالة احتمال ، لم يتقدم به بورن إلا بعد أن اكتشف شرودنجر معادلته ، وبعد أن وضع هيزنبرغ ميكانيكه المصفوفي (المترجم) .



شكل ٢ — ٦

تجربة « ثقبايونغ » في حالة الجسيمات الكمومية : (هذا الشكل امتداد للشكل الوارد في الصفحة ٤٦) هناك حزمة إلكترونات يجب أن تجتاز حاجزاً مثقوباً في مكانين S_1 وS_2 قبل أن تصل إلى الشاشة Ox . نعد في كل نقطة M من الشاشة عدد الإلكترونات التي وصلت إليها (كأن نعد مثلاً عدد مرات التألق إذا كانت الشاشة براقة ، أو عدد الحبيبات المتأثرة إذا كانت الشاشة مغطاة بمستحلب حساس) ، فإذا سلكت الجسيمات سلوك جسيمات كلاسيكية ، عندئذ تتوزع الشدة كما في الشكل (a) ، أي مثل مجموع الشدات النسبية عند فتحة كل شق ($I_{12} = I_1 + I_2$) . والحقيقة ، عندما نغلق الشق S_2 نحصل على الشدة I_1 في المنطقة المتمركزة بجوار M_1 ، وعندما نغلق الشق S_1 نحصل على الشدة I_2 بجوار M_2 . ولكن عندما نفتح الشقين S_1 وS_2 فإن الشدة التي نحصل عليها على الشاشة هي الممثلة على الشكل (b) النموذجي لظواهر التداخل ($I_{12} \neq I_1 + I_2$) على الرغم من أنه يمكننا أن نعد صدماتها المتوضعة على الشاشة . فالإلكترونات إذاً ليست جسيمات بالمعنى الكلاسيكي . وعلى الرغم من أنها تبدي خواص التداخل ، فإنها أيضاً ليست أمواجاً بالمعنى الكلاسيكي ، لأننا نستطيع أن نعدها .

القياسات « الفلكية » مثلاً التي يمكن أن يبلغها الفلك بالتحديد ، أو بشكل أفضل أيضاً ، البصريات . ويكفي أن نذكّر القارئ بـ ٤٢,٩ ثانية في القوس المتبقية من تقدم أوج عطارد (أي مبادرة أقرب نقطة في مدار عطارد إلى الشمس) التي لم تستطع أن تفسرها سوى نسبية أينشتين العامة . أو لنفكر بإمكانية العمل الدقيق التي بلغتها تجارب التداخل في علم البصريات . ولاسيما في التجربة التي قام بها مايكلسون وموريلي اللذان برهنا على عدم وجود أي « ريح أثيرية » ، فقد بلغت هذه الدقة عندئذ أقصى ما استطاعه إنسان .

ولكن دعونا نتساءل : علام تقوم عملية القياس ؟ أليست في الحقيقة أكثر المراحل اهتماماً بالتقدير الكمي في عملية الملاحظة الأشمل ؟ إذ تقوم هذه الأخيرة (الملاحظة) بالدرجة الأولى على تأثير متبادل فيزيائي بين الشيء الملاحظ أو المقاس وبين جهاز القياس ، وذلك عبر تأثيرات متبادلة تتوسط بينهما : كأن تكون مثلاً بين كوكب سيار ومقراب ، أو بين حصى وميزان ، أو بين تيار كهربائي ومقياس أمبير ، أو بين جسيم أولي ومسرع معه كشافاته المعروفة . ففي حالة الكوكب السيار والمقراب ، يتمثل هذا التأثير المتبادل بانعكاس الأشعة المضيئة القادمة من الشمس على الكوكب ثم وصولها إلى المقراب . وتقوم عملية القياس ، بالدرجة الثانية ، على تأثير متبادل جديد يلي الأول وأعقد منه ، ويتم بين آلة القياس التي تعطي المؤشر (كأن يكون وضع إبرة على لوحة مدرجة) وبين الأعضاء التي تقوم بعملية القراءة والتأويل ، والتي ترجع بصورتها النهائية إلى تأثير متبادل يتم في مجال أعضاء الحس والجملة العصبية . وقد كانت الفكرة قديماً في الفيزياء الكلاسيكية هي أن القسم الأول من العملية يتم دائماً بحيث أن الشيء المقاس مستقل تماماً عن آلة القياس . وحتى وإن كانت هناك تعديلات طفيفة يمكن أن تطرأ على الشيء ، إلا أن هذا التعديل إما أنه مهمل (إذ ما من أحد يهتم لتقهقر نجم نتيجة لطمه بالأشعة الضوئية) ، وإما أنه يمكن حسابه (فمثلاً : تؤدي عملية قياس التيار الكهربائي الذي يجتاز دارة معينة ، إلى تعديل بسيط في هذا التيار نتيجة لإقحام المقياس في الدارة ، إذ تنضاف مقاومته فيها على التسلسل) . وبوجه عام ، فإن كل عملية قياس تهدف إلى الكشف عن إشارة أو معلومة ، لابد أن تصطدم ببعض « التشويش » الذي يعرقل

سيرها . لذلك كان لابد من تقليص هذا التشويش ، وإن كنا نعلم أن إزالته مستحيلة . ففي البصريات مثلاً ، نجد أن ظاهرة الانعراج تحد دائماً من قوة الفصل في المجهر . كما أن من الثابت بوجه عام أنه لاوجود للقياس الفيزيائي الكامل الدقة ، ولكن حدود الدقة التي نتوصل إليها تكون عادة كافية جداً بحيث يمكن أن نتحدث عن الظاهرة بذاتها ، وأن نصفها بغض النظر عن قياسها وعن وجود الملاحظ المجرب .

غير أن هذه الطمأنينة التي كنا ننعم بها ، سنرى عما قريب كيف زالت من عالم الكم . ولكن دعونا ، قبل كل شيء ، نقول كلمة عن الرابطة بين القسم الأول والقسم الثاني من عملية القياس . ففي نهاية القرن الماضي ، كان الفيزيائي والفيلسوف النمساوي إ . ماخ Ernst Mach قد قام بتحليل نقدي لعملية الملاحظة (أو القياس) خرج منه بأن العناصر التي يتألف منها الشيء المقاس (الموضوع) ، والعناصر التي تتدخل في صياغة الإحساس ، هذه العناصر متشابكة بشدة بحيث لايمكن أن نميز بعضها من بعض ، ولايمكن أن نفكر فيها وهي منفصلة ، وبأن ذلك الحديث عن الشيء بمعزل عن الإحساس الذي يولده فينا ، وبالتالي ملاحظته ، ليس له أي معنى . لذلك كان هذا الرأي هو أحد المعتقدات التي تأخذ بها الوضعية . ثم تبنى بعد ذلك كثير من فيزيائيي الكم وجهة نظر مماثلة . لا لأنها أصبحت مدعمة باكتشاف الظواهر الكمومية فحسب ، بل لأنها كانت تقوم أيضاً على أسس فلسفية أشمل وأعم كانت قد انتشرت في ذلك العهد ، وهذا ما قد تفيدنا معرفته . بل قد يحسن بنا أن نلاحظ بهذه المناسبة ، بأن كل دعوى فلسفية حول المعرفة ، نادراً ما تكون بوجه عام — أو ربما ليست أبداً — نتيجة مباشرة لظاهرة أو لنظرية فيزيائية . لذلك تعالوا نضيف هنا هذه الدعوى — التافهة في ظاهرها — وهي أنه ما من علم قادر مباشرة على إفراز فلسفة ، وبالعكس . إن العلاقات بين وجهتي النظر هاتين (الفلسفة والعلم) حول العالم ، اللتين لاتنفي إحداهما الأخرى ، بل على العكس تماماً ، هذه العلاقات هي أعقد بكثير مما تبدو في ظاهرها ذاك . ولكن دعونا الآن من الفلسفة ، ولنعد إلى القياس .

إن الفارق الأساسي بين عملية القياس أو الملاحظة في الفيزياء الكلاسيكية ، وبينها في الفيزياء الكمومية يكمن في طبيعة مفعول التأثير المتبادل (بين

أدوات القياس والملاحظة ، وبين الشيء) الذي يبلغ في ضآلته حد الإهمال ، أو يمكن اعتباره كذلك في **الحالة الأولى** (الكلاسيكية) ، حتى أن الشيء ، في هذه الحالة ، يعتبر باقياً على حاله قبل الملاحظة وبعدها ، وبأنه مستقل كلياً عن العملية التي تمت فيها هذه الملاحظة .

أمـا في **الحـالة الثـانيـة** ، أي عنـد قيـاس أشيـاء كمـوميـة ، فـالأمور تبدو غير ذلك تماماً ، وهذا ما أدى إلى ظهور فارق في تأويل كلمة موضوعية ، فما يفهم منهـا في حالة الفـيزياء الكموميـة ، غير ما يفهم منها في الحالة الكلاسيكية . فبحسب مضمونها في الحالة الثانية ، يمكن تمييز الشيء من الأداة التي تراقبه . وأما في الحالة الأولى فهذا التمييز يصبح صعب المنال جداً . حتى ليرى البعض أنه مستحيل . وأن الموضوعية ترتد عندئذ ــ وهذا رأي متسـاهل ــ إلى أنها هي الشيء المتفق عليه في أقوال هؤلاء وأولئك حول الظـواهر (أي أنهـا ترتد إلى شـكـل من أشكـال « البـين شخصيـة intersubjectivité » لا أكثر) .

وإذا شـئـنـا إعطـاء وصف فج لعـمـليـة قيـاس المتغـيرات التي تميز منظومة معينة في ميكانيك الكم ، فإننا نقول إنها تبدو نفياً بحتاً وبلا مواربة للسببية . فهذه الأخيرة كان قد حماها من خلف كل التبدلات القاسية التي ذكرناها ، وجود معادلة حركة تصف تطورات حالة المنظومة التي تمثلها دالة الموجة الخاصة بها ، إذ إن معادلة شرودنجر Schrödinger تعبر عن التطور السببي المستمر (أي من قريب لقريب) لدالة الموجة . بمعنى أن قيمة هذه الدالة في اللحظة (t) تكفي لتعيين قيمتها في اللحظة التالية لها مباشرة t + dt ، وذلك بفضـل الشكـل التفـاضلي للمعادلة . وهذا على الأقل بالنسبة لمنظومة كمومية متروكة لذاتها دون أي مداخلة من مراقب . أما عندماتخضع هذه المنظومة لعملية قياس ، فإن دالة الموجة التمثيلية الخاصة بها ، ستعاني تحولاً قاسياً ، منقطعاً ، نصفه بأنه منفصل discret (وليس المقصود هنا ، هو المعنى المقبول عادة من كلمة discret « أي متحفظ » . فنحن هنـا لانتحدث إطلاقاً عن تحفظ ، بل إن هذه الصفـة لاتفهـم في الرياضيات والفيزياء بمعنى أنها خجل أو تواضع ــ الأمر الذي يؤسف له حقاً ، إذ قد يُستَحَب أحياناً مزيد من التواضع والخجل في طريقة صياغة المسائل الحساسة ــ ولكن

المقصود هنا هو تغيرات متقطعة على شكل كميات تامة) . إن هذا التحول (المزاجي) المنقطع (المفاجئ) لدالة الموجة ، إلى قيمة خاصة ، يدعى « اختزال الحزمة الموجية » . إنه لاسببي ، لأنه غير متوقع . إذ إن كل ما نعرفه هو أنه يمكن أن يحدث عند هذه القيمة أو تلك من جملة القيم الممكنة ، وباحتمال معين يمكن حسابه . وعلى الرغم مما يبدو في عبارة « اختزال الحزمة الموجية » من أنها تلح على المظهر التموجي للمنظومة الفيزيائية الملاحظة ، إلا أنها ترمي إلى ما هو أشمل من ذلك بكثير ، فهي بالأصح ليست أكثر من صورة تساعد على إظهار ما هو المقصود بجلاء . لذلك ، ولكي لانركز تركيزاً ليس في محله على الصورة (نفسها) ، يمكن أن نتحدث عن (اختزال) لاغير[1] .

إن ما تعبر عنه هذه الصورة ، هو أننا إذا فضلنا النظر إلى المنظومة التي ندرسها على أنها جسيم (متوضع على مسار مثلاً) ، علينا أن ننظر إليه على أنه تموجات ، لاعلى أنه موجة وحيدة ذات تواتر معطى ، بل على أنه تراكم أمواج تواتراتها (أو دفوعها) مختلفة ، أي حزمة موجية[2] . إن قياساً واحداً لدفع (أي لكمية حركة) منظومة مثل هذه ستكون نتيجته قيمة واحدة من هذه التواترات ــ وهذا هو الاختزال . ولما كانت جميع التواترات متكافئة إلى حد ما (بتقريب احتمالاتها على الترتيب) فإن نتيجة القياس عشوائية تماماً . ولايمكننا أن نتنبأ بها بأي حال من الأحوال ، حتى بأدنى ما يمكن من الثبات واليقين . وهذا ما يفسر كيف كانت هذه آخر نكسة عنيفة للسببية ، فقد اختفت بعدها نهائياً في حادثة القياس .

* * *

لم يطور بوهر من جهته أي نظرية للقياس الكمومي . فقد كان يظن بسبب موقفه من صلات المفاهيم الكلاسيكية بالظواهر الكمومية ، أنها غير مجدية .

---

(١) كما أنه ، بدلاً من الحديث عن « دالة الموجه » يفضل كذلك الحديث عن « متجه الحالة » ، إذ لايدين هذا المقدار بشيء لأحد من أصحاب المقام الرفيع في الكم ، بل يدين بكل شيء لتعريفه الرياضي الذي يمثل المنظومة الفيزيائية المرعية .

(٢) انظر ص ١٦٧ ــ ١٧٠ في القسم الأول .

ويرى ، أن التعارض بين الملاحظة الماكروية وبين ظواهر العالم الميكروي ، قد أزيل نهائياً ، أو أن حدته قد خفت تماماً بعدما وضع مبدأ التكاملية أمامنا عدة تفسيرات متكاملة للظواهر . ومن هذا المنظور ، لم تكن مسألة القياس ذات طبيعة مختلفة ، لاسيا أن أدوات القياس الماكروية ، هي من الأشياء الأولى التي هيئت منذ القديم ، وحتى قبل أن تكتشف الظواهر الكمومية نفسها وقبل نظرية الكم . لذلك ، أي نظراً إلى أن الأداة الماكروية سابقة منطقيـاً بالنسبـة لنظرية الكـم ، فهذه الأخيرة ، ليس فحسب أنها لايمكن أن تعطينـا إيضاحات عن الأداة ، بل ليس مفترضاً فيها أن تفعل ذلك . فتبعاً لوجهة النظر هذه ، لايمكن أن توجد نظرية كمومية لأداة القياس ، حقاً أن هذه الأداة ، هي إحدى وسائل معرفة ظواهر الكم التي لاغنى عنها ، أي أن شأنها في ذلك شأن المفاهيم الكلاسيكية التي تشكل في نظر بوهر المرجع الأساسي لنظرية الكم ، ولكن هذا لايعني ، بأي شكل ، أن يكون الهدف من محاولة إرجاع المفاهيم الكلاسيكية إلى كيانات ميكروية ، هو التعبير في النهاية عن هذه الأخيرة بعبارات كلاسيكية . والأمر بالتالي كذلك في القياس . فنظرية القياس الكمومية يجب إذاً تجاهلها **لصالح مبدأ اختزالي للحزمة الموجية** . وهذا المبدأ يجب وضعه على قدم المساواة مع المبادئ والقضايا الأساسية في نظرية الكم .

ترى ، ألا يـلخـص هـذا المـوقف الذي اتخذه بـوهـر جـوهـر المشـكـلة بشكل لامثيل له ؟ هذا ما ظنه دائماً رجل مثل ل . روزنفلد Leon Rosenfeld ، وبخاصة بعد التحسينات اللاحقة التي أدخلت على « الحلول » التي قدمت لمسألة القياس . غير أن اعتبارات عامة بهذا الشكل لايمكن أن تكون بالنسبة لآخرين شيئاً مقنعاً ، بل لقد بدت لهم وكأن بوهر كان يعتم بهذا العرض الفلسفي على مسألة القياس ، التي ربما كانت على الرغم من كل شيء ، ذات طبيعة فيزيائية . فالأفضل طبعاً ، في هذه الفرضية أو تلك ، أن نحاول التمعن فيها عن كثب .

وقد كان فون نيومان Von Neumann صـاحب الفضـل الأول في معالجة هذه المسـألة في كتابه « بحث أسـاسي في ميكانيك الكم » الذي سـار فيه على المنهج الإبداهي axiomatique . فكانت شكليته صالحة في جميع الأحوال . وكان من الطبيعي أن ينساق فيه نيومان إلى الاهتمام بمسألة القياس بشكل محدد واضح ، على الرغم من أنه

كان من حيث الجوهر موالياً لأفكار بوهر ولمدرسة كوبنهاغن . لذلك فإنه قام بذلك ، إما لكي يطوي وصف عملية القياس في إطار الشكلية الكمومية ، وإما على العكس ، لكي يبرهن فعلاً ــ لا أن يكتفي **بالتصريحات** كما فعل بوهر ــ بأن عملية القياس غريبة عن ميكانيك الكم . وكان أن خلص نيومان إلى هذه النتيجة الأخيرة ، إلا أنه وصل منها إلى ملاحظات تختلف اختلافاً بيناً عن ملاحظات بوهر . إن المبدأ الذي انطلق منه ، والذي انطلقت منه بعدئذ جميع المحاولات اللاحقة ، حتى التي تعارض نتائجه ، هو أن يعامل آلة القياس على أنها منظومة كمومية تتميز بكمية يمكن مشاهدتها ، وتمثل بمؤشر وبدالة موجة يمكن أن تأخذ عدة قيم ممكنة (دوال خاصة) . لقد برهن في الحقيقة أن شكلية ميكانيك الكم ، يمكن أن تطبق بحذافيرها على إجراءات آلة القياس . وكانت المسألة المطروحة حينذاك هي كيف يمكن إرجاع قفزة الدالة الموجية للمنظومة الخاضعة للملاحظة ، إلى تحول مستمر للمنظومة الكلية بفرعيها ، أي للمزدوجة « المنظومة الملاحظة ــ آلة القياس » . ولتحقيق ذلك ، بيَّن فون نيومان وجوب التمييز بين المرحلتين التاليتين في عملية القياس ، وهما التأثير المتبادل بين الشيء (الملاحظ) وبين الآلة ، ثم فعل الملاحظة ذاته . وقد برهن أن الحل الوحيد هو التالي : يمكن بواسطة التأثير المتبادل بين الشيء وبين الآلة ، إرجاع معرفتنا لدالة الموجة للشيء إلى معرفتنا لدالة الموجة للآلة . ولكن كيف نعرف دالة الموجة للآلة ما لم يكن لدينا آلة أخرى نستعين بها لهذا الغرض ، ثم آلة أخرى أيضاً ، وهكذا دواليك ؟ وعلى هذا فإن عملية القياس ستصبح عملية تراجعية لانهاية لها ، الأمر الذي لايتفق مع أي واقع عملي (إذ إن عملية القياس عملية منتهية) . وهكذا خلص فون نيومان من ذلك إلى أن اختزال الحزمة الموجية ، أو بالأحرى إسقاط دالة الموجة على إحدى قيمها[١] ، لايمكن رده إلى سيرورة (أو عملية) مستمرة وسببية ، فهو بالتالي غريب عن النظرية . ولكن أين يحدث الاختزال في هذه الحالة إن لم يكن في شعور الملاحظ . فعملية القياس في النهاية ليست عملية فيزيائية بحتة ، وهي لاتعتمد على هذا التصور المثنوي (القديم) الذي كان يفصل بلا رجعة عالم الشيء الملاحظ (بفتح الحاء)

(١) يطلقون اسم « مسلمة الإسقاط » على الفرضية التي تقول : إن دالة الموجة (أو متجه الحالة) للمنظومة ، تتحول بعد عملية القياس مباشرة ، من حالة التراكم التي كانت فيها من قبل إلى مسقطها ، على إحدى قيمها الممكنة الموافقة لنتيجة القياس .

عن عالم الكائن الملاحظ (بكسر الحاء) ، أو عالم المادة عن عالم الفكر ، بل هي بحاجة إلى مداخلة من شعور .

ولقـد أعطى ف . لنـدن Fritz London وإ . بـوير Edmond Bauer نـبرة أشـد أيضـاً وأكثر أصـالة لوجهـة النظر هذه ، ففيما كانت رغبتهما هي شرح نظرية نيومان في القياس لاغير ، أشارا بوضوح وجلاء إلى تأثير (أو فعل) الفكر في عملية القياس . ففي رأيهما أن عملية القياس في عالم الكموم هذا ؛ الغريب فعلاً ، تحتاج أساساً وبالضرورة إلى مداخلة الفكر البسيكوفيزيائية (أي النفسية البدنية) ، ولايتم الحصول على نتيجة القياس إلا بتأثير الفكر في آلة الملاحظة مباشرة ، بمعنى أن آلة القياس بتبادلها التأثير مع الشيء الملاحظ ، تسير نحو هذا التدريج أو ذاك الذي يحدد حالتها النهائية . فالفكر إذاً ، بحسب وجهة النظر هذه ، هو الذي يتدخل لكي يقرر (وبقرار موضوعي) حالة الشيء الملاحظ(١) . وهنا تذكّرنا هذه الرابطة بين الحالات الفيزيائية وبين حالات الشعور بآراء ماخ ، ولكن بصيغة فيها كثير من الإفراط (علماً أن ماخ نفسه تحدث عن الإحساسات) . ولنحكم على ذلك : إن العالَم الفيزيائي ، بتبادله التأثير مع الشعور ، يولد آثاراً نفسية ، فتؤثر هذه عند إرتدادها في الظواهر الفيزيائية ، فصياغة لندن وبوير ، والحق يقال ، لاتقل بأي شيء عن أبعد إنجازات الخيال العلمي تحليقاً وخروجاً عن المألوف . بالفعل ، دعونا نتحول إلى غواصتنا المجازية : إن هذه الأشياء التي نتوجه إليها لكي تصف نفسها ونقوم نحن بترجمة إجاباتها بأدواتنا ، تكشف فجأة عن نفسها حال التفاتها إلينا ، وإذا هي تعيد إلينا صورتنا الخاصة . فما نكتشفه في نهاية تحليلنا الدقيق للعالم الميكروي ، هو فكرنا ذاته ، أو أقل ما فيها ، نكتشف آثاراً منقولة عن هذا الفكر . فهذا التأويل إذا ما أخذ بحرفيته ، يمكن أن ينسب إلى نوع من **التغيير في وجه** العالم الميكروي ، الكمومي . ولكي تُكوّنوا صورة عن ذلك دعونا نتخيل الغَواصة ومستكشفيها وهم يحاولون الاقتراب من هذا العالم ، وأن هذا الأخير قد انحلّ فجأة أمامهم إلى ضياء يغشي الأبصار ويملأ جميع الأرجاء . إن هذا الضياء هو ، إن صح لي القول ، فيض أو

---

(١) هنـاك وجهـات نظر مماثلة (مع بعض التغييرات والتحسينـات) كان قد تقدم بها فون فيسـاكر Von Weiszacker وفيغنر Wigner إلخ .

انتشار عالمهم العقلي . أضف إلى ذلك أن لندن وبوير يتحدثان عن « حالات الشعور » وعن تراكاتها مثلما يجري الحديث عن الحالات الكمومية نفسها . وهكذا نصل في النهاية إذاً إلى هذه المفارقة الغريبة عن نظرية الكم ، التي كان يظن أنها قادرة على وصف الظواهر الفيزيائية ، وإذا نحن نكتشف أن هدفها الحقيقي هو الأمور النفسانية .

غير أن هناك العديد من الفيزيائيين الذين لايمكنهم أن ينظروا بعين الرضى إلى نتائج متمادية وبعيدة إلى هذا الحد . لأنها ستؤول في النهاية إلى رفض تلك المسلمة الأساسية عندهم ، ألا وهي أن النظرية الفيزيائية لاعلاقة لها إلا بالظواهر الفيزيائية وحدها . وهم يقولون باختصار إن من المستحيل التقدم في معرفة الفيزياء ما لم ننظر في هذا الفرع المعرفي بذاته . والحقيقة أن الفيزياء تتقدم ، وهذا أمر واقع ، لاسيما بالنسبة للأمور المتعلقة بظواهر عالم الصغائر وعالم الكم بعامة . ففي كل يوم تزداد الدقة في اكتشاف هذا العالم ويزداد الوضوح في فهمه وخواصه . أضف إلى ذلك أن آلة القياس يمكن أن تسجل النتيجة آلياً . فمن الواضح عندئذ أن ليس لحالة الشعور عند المراقب أي شأن بها . فالأفضل إذاً ، إذا ما أردناأن نضفي على الفيزياء ما يبدو أنها جديرة بأن توصف به من الصلابة والمتانة ، أن نعود إلى حيث بدأنا ، وأن نبذل جهداً أكبر لكي نرى كيف تطرح مشكلة القياس . وفي هذا الشأن ، هناك محاولات عديدة مفروضة ، ولكننا لن نذكر هنا سوى بعض من اتجاهاتها التي تعد من أكثرها دلالة .

أولاً ، لابد لنا ، لكي نرى الأمور بوضوح ، من أن نحقق شرطاً ، وهو التمييز قدر الإمكان بين مختلف المراحل في عملية الملاحظة والقياس . فمن هذه المراحل ، هناك مرحلة يبدو أنها أساسية . وقد نبه إليها بوهر . ولكن الذي أبرزها بوضوح هو هـ . مارجينو **Henry Margenau** . وهي مرحلة الطور التي يقال لها مرحلة « تحضير الحالات » . فهذه يأتي مكانها في عملية تحديد دالة الموجة لمنظومة بقياس حالتها . لنأخذ منظومة معروفة تماماً ــ ولتكن ذرية مثلاً ــ إن هذه المنظومة يمكن أن تكون في واحدة من عدد من الحالات الممكنة التي تتعين كل منها بإعطاء قيمة معينة للعزم المغناطيسي . فقبل أن نمارس عملية القياس على هذه المنظومة ، ننقلها إلى وضع مهيأ ، وليكن حقلاً مغناطيسياً مثلاً . فهذا الحقل ، سيساعدنا على تميز كل حالة عن الحالات الأخرى

بواسطة الانحراف الزاوي الخاص بها . فدالة الموجة للمنظومة بالنسبة إلى هذه الحالات ، لاتتعين قبل أن تتدخل عملية القياس نفسها (وهكذا ننساق نحو الطبيعة الاحتمالية للسببية) .

إن اختزال الحزمة الموجية في نظر البعض ، يأتي دوره لحظة ينتشر مفعول التأثير المتبادل الميكروي بصورة ترموديناميكية إلى آلة القياس بأكملها . ومن هنا أتت طبيعة هذا المفعول اللاعكوسة ، وبرزت حقيقة أنه لايخضع لقوانين نظرية الكم . ذلك أن الاضطراب الخفيف ذات المنشأ الكمومي ، يضخمه شلال الظواهر التي ترتبط بالفيزياء الإحصائية (من ذلك مثلاً : تراكمات إلكترونية ، انتقال السائل في غرفة الفقاعات من حالة ما بعد الاستقرار إلى الاستقرار إلخ) . فالقياس في ميكانيك الكم ، يخضع تبعاً لوجهة النظر هذه ، لمبدأ الترموديناميك الثاني ـــ أي أنه يخضع لقانون في الفيزياء الماكروية . وقد اعتمد أ . دانري Antonio Daneri وأ . لوانجيه Angelo Loinger وج . م . بروسبيري Giovani M.Prosperi على هذا الرأي ، فطوروا بناء على هذه الأسس التي وضعها ب . جوردان ، وبوجه خاص غ . لودفيغ Gunther Ludvig نظرية « ارغوديه ergodique » للقياس الكمومي . ويتم الاختزال ، بحسب هذه النظرية ، بعد تبادل التأثير بين المنظومة الكمومية وبين تجهيزات القياس الماكروية ، أي في أثناء إعادة توزيع الطاقة أيضاً التي صرفت في هذه الأخيرة (أي في تجهيزات القياس) . فهذه النظرية قد تبدو للبعض امتداداً لتصورات بوهر وآرائه . إذ ثمة إشارة تعيدنا إلى إلزامية التجهيزات الماكروية للقياس ، ولكن دون التأويلات العجيبة التي من مثل تلك التي ذكرناها سابقاً .

وحوالي العام ١٩٥٧ طور . إيفريت الثالث Hugh Everett III نظرية عن القياس تخالف المحاولات السابقة ، وذلك بنظرته إلى القياس على أنه تبادل تأثير عادي . حتى أنه لم يفرض في الأدوات خواص ـــ كلاسيكية ـــ قد لاتلين أمام الشكلية الكمومية . وقد حل مشكلة الاختزال بأن بيّن أنه ليس ثمة اختزال . لأن تبادل التأثير بين أداة القياس ـــ المعالجة بطريقة كمومية ـــ وبين المنظومة الواقعة تحت الملاحظة ، تحتم أخذ **لاانفصالية** الدالة الموجية للمجموعة « أداة ـــ منظومة » بعين الاعتبار . إذ إننا نعلم من الفصل السابق أن اللاانفصالية توجد بمجرد وجود تأثير متبادل . أو بتعبير آخر ، لايمكن

أن نتحدث عن حالة منظومة جزئية ، إلا إذا كان حديثنا عنها نسبياً ، وبالنسبة للمنظومة الباقية . وهذا أصل تسمية هذا الاتجاه ، **بنظرية الحالة النسبية** . فالقياس إذاً ، لايساعد على استخلاص حالة المنظومة الكمومية الملاحظة ، منعزلة ، (أي حالتها بمفردها) ، في حين أن وجهات النظر السابقة كانت تصرح بأنها « اختزلت » بتبادل التأثير هذا إلى المركبة المقاسة . والقول بأنه تم « الاختزال» إلى هذه القيمة ، معناه أننا نسينا اللاانفصالية ، أي أننا خالفنا تعليمات الشكلية الكمومية ، وأننا نريد أن ننظر إلى مسألة كمومية بطريقة كلاسيكية . إذاً لايمكن لوجهة نظر متماسكة و« متسقة » حول القياس بمعناه الكمومي أن تتحدث عن « اختزال » . ومع ذلك يوجد **تأثير متبادل** ، والمعالجة الكمومية لأداة القياس تساعد ــ باستخدام مبدأ التراكم ــ على العودة من الحالة الملاحظة لأداة القياس الماكروية ، إلى الحالة الابتدائية لدالة الموجه للمنظومة الكمومية . وكانت المنظومة الكمومية أصلاً ، قبل القياس ، في الحالة الموافقة لنتيجة القياس : فالتأثير المتبادل مع الجهاز لم يكن له أي تأثير ، سوى أن يحول إعطاء هذه الحالة الابتدائية دفعة واحدة إلى إعطائها على شكل متقطع ومتتال[1] (على التسلسل) . ولكن النتيجة من الوجهة العملية هي نفسها التي يعبر عنها مبدأ الاختزال الكاذب ، ففي الحالين : نحصل على الحالة المرعية باحتمال معين . ولكن الشيء الذي تعدل في هذه الصيغة الجديدة ، هو أساس التأويل ذاته . لأن تعيين حالة المنظومة الكمومية ليس غريباً عن هذه المنظومة ، ولا يفرضه مراقب خارجي بطريقة لاسببيه .

وقد عاد بعد ذلك إلى هذه المحاولة التي تبناها أيضاً ج . هويلر **John A. Wheeler** ، كل من ر . ن . غراهام **R.Neil Graham** وب . ويت **Brice de Witt** ، ولكن بوجهة نظر سموها « العوالم المتعددة **many – universes**» . إذ إن هؤلاء ، حين أخذوا في الحسبان مجموعة الدوال الموجية الممكنة ، أي مجموعة عناصر التراكم الابتدائي الممثل بدالة الموجة العامة للمنظومة ، تخيلوا أن « العالم » الذي تصفه هذه الدالة الأخيرة ينشطر في لحظة التأثير المتبادل إلى مجموعة من العوالم بقدر ما يوجد من عناصر

(١) ينجم ذلك عن « تعامدية »الدوال الموجية الموافقة لحالات مختلفة . فهذه التعامدية هي التي تجعل مفعولات الحالات الأخرى معدومة .

التراكم . وفي كل من هذه العوالم يعطي القياس النتيجة المرتقبة ، أي العنصر الموافق لها من التراكم . ففي وجهــة النظر هذه إذاً مرتع خصب لفكرة « العوالم المتوازية » المعروفة في قصص الخيال العلمي ؛ ولكن هذا الشرح الإضافي ، في الحقيقة ، يعقد المشكلة كما يبدو بإرجاعه التراكم (الكمومي) للحالات إلى الجمع (الكلاسيكي) لهذه الحالات (دون أن يجني فـائدة من ذلك . في حين أن التماسك الذاتي في معـالجة حالات منظومة ما ، معالجة كمومية ، لايحتاج إلى تفسير كهذا .

وحتى لو قبــلنـــا بمفـهــوم **الحــالة النسبيــة** ــ الذي عورض أيضـــاً ــ فإن هذا ليس كافياً لأن نقول إن وصف عملية القياس قد أنجز . ومن المناسب ، عند المثابرة على السير في منحى الوصف السببي ، أن نعبر عن الشروط الفيزيائية ــ التي تقود إبرة الجهـاز إلى التوضع في الاتجاه الملاحظ ــ منطلقين من التأثيرات المتبادلة الأولية . وهذه الشروط ، يعبر عنها بشكل بسيط في نموذج كوليمان ــ هيب Coleman – Hepp مثلاً . وهناك مؤلفون آخرون يلحون على ضرورة تمييز التأثير المتبادل الميكروي بين الشيء وبين جزء من آلة القياس من جهة (وهو تأثير غير عكوس بمعنى تحويل المتجهات الكمومية لا بالمعنى الترموديناميكي) ، ثم التضخيم (الإرغودي) من جهة أخرى ، وهو التضخيم الذي تقوم به الآلة نفسها ، والذي هو بطبيعته الترموديناميكية لاعكوس ، ويأتي بعد الاختزال ، وهو غريب عنه ، ولايفيد في شيء سوى أن يضع بين يدي المراقب بحركة من الجهاز (أو بالأحرى بحركة إبرة مثلاً أمام لوحة مدرجة) إعلاماً ذا منشأ سابق . فلابد لنظرية تراعي هذه الأمور من أن تأخذ بعين الاعتبار ، بعد مرحلة تحضير الحالات ، خواص التأثير المتبادل الابتدائي الذي يؤدي إلى الاختزال . وقد ينتج الاختزال مثلاً بمعناه الحصري من عملية قيمة وسطى تدور حول تأثيرات متبادلة أولية تستثيرها التجهيزات الماكروية (ولابد أن معالجة كمومية لهذه التجهيزات ، تستخدم فيها لغة منظومة ذات عدد كبير من الجسيمات ، أن تلقي الضوء على هذه التأثيرات) . ويعالج التأثير المتبادل على أنه عملية ديناميكية يمكن وصفها بنظرية البث الكمومية . فالمسألة عادت الآن إلى مسألة المعالجة الكمومية لجهاز القياس (تمثيله بمؤثر إحصائي ، واختيار نمط الدوال الموجية التي يُجري تأثيره عليها) . وهناك أعمالِ حديثة جارية الآن لاستطلاع هذا الاتجاه .

لقد أصبحت مشكلة القياس ، منذ أن عرض نيومان ملاحظاته ، موضوعاً للعديد من المطارحات الحامية التي ملأت الصحف والمجلات لكثرة ما نشر عنها من دراسات ومقالات ، وصارت هدفاً للعديد من التأملات التي ذهبت مذاهب شتى وفي اتجاهات مختلفة . وليس أدل على أن هذه المشكلة مازالت مفتوحة للنقاش ، من أن متزعميه لم يستطيعوا حتى الآن أن يقنع أحدهم الآخر . بل يمكن أن نقدر ، دونما خوف من الزلل ، بأنها لو كانت قد حلت ، لكانت جميع ريبنا حول تأويل ميكانيك الكم ، قد انمحت مرة واحدة ، ولظهرت هذه النظرية عارية صريحة دون أسرار ، تشبه في صراحتها تلك الصراحة البادية اليوم في الميكانيك النيوتوني أو الترموديناميك أو النسبية (هذا طبعاً إذا فرضنا أن هناك عرياً خالياً من الأسرار والغموض) .

* * *

خلاصة القول ، فقد أصبح من الأشياء المألوفة أن نسمع الآنسة سببية تزعم دوماً أنها تعود حية من بلاد الكم . وتلك الرسالة التي تركتها قبل أن تركب مطيتها لترحل صوب الأصقاع المعزولة ، سيرددها كثيرون ممن ساروا في إثرها يسألون عنها الوديان العميقة والصخور والخرائب ، لأنهم لن يعرفوا الهدوء والسكينة في بلاد الكم إلا حين ينالون مكافآتهم المفضلة باسترداد السببية صحيحة معافاة، فهي عندهم أفضل من كل الكنوز الخرافية التي تخيلها إنسان .

٤ ــ حكاية الكم التي لاتنتهي
نحو نظرية كمومية للمادة

لم تنتـه بعد قصـة رحلتنـا إلى بلاد الكـم . فالتطورات السـابقـة مازالت تثير الجدل . فحتى وإن بدا من الصعب بعد الآن ، تعريض النتائج والاستنتاجات التي توقفنا عندها ، للشك (كقولنا مثلاً إن السببية لم تعد كما كانت إلخ ..) ، إلا أن شيئاً من عدم الرضى مازال يخيم إلى الآن ، لأن بعض دعاوي نظرية الكم يشوهها عدم الوضوح ، ثم إن عدد المستائين ، يزداد بين أولئك الذين يعتقدون بأن نظرية الكم ، على الرغم من أنها مفيدة ومثبتة ، وهذا مايسلمون به ، إلا أنه لايزال في صميمها شيء من الهشاشة الأصيلة وآثار من الغموض تخيم على مبادئها التأسيسية .

هذا ، ومن جهـة أخرى ، لايزال هنـاك ، بعـد المحطة التي توقفت عندها رحلتنـا إلى عالم الصغائر ، عالم آخر مليء بالأسرار . فبعد الاستطلاعات الأولى التي تمركز في إثرها فريق أساسي أظهر قدرته على تحديد الملامح المميزة لظواهر الكم على الصعيد الذري ، تلاحقت ، وبلا توانٍ ، بعثات واختبارات أخرى أثبتت فائدتها وتوصـلت إلى اكتشاف كنوز عديدة . وكانت هذه البعثات مكونة من وحدات رئيسية مستقلة نسبياً .

وهكـذا فـإن النشـاط الاستطـلاعي الذي تـركز في بـادئ الأمر على مجال الذرة ، أصبح يدعى الآن ميكانيك الكم . وكما كان المؤرخ البروتستانتي ، الكاهن ج. دي ليري Jean de Lery ، يتحدث سابقاً عن « أرض البرازيل ، وهو يعني بذلك أميركا » كان باستطاعة فيزيائيي نهاية العشرينيات أن يتحدثوا عن أرض الذرة وأرض الكم وكأنهما متكافئتان . وكانت القوة المسؤولة عن خواص الأجسام في هذه الميادين الذرية ، هي القوة المرتبطة بالحقل الكهرطيسي ، الذي نعرفه تماماً في عالمنا المألوف ، أي في ذلك

العالم الذي أصبحت مسالكه ومفارقه واضحة سهلة العبور . وكانت هناك أيضاً قوة أخرى أساسية معروفة في هذا العالم فوق الكمومي ، وهي قوة الثقالة . إذ إن كل جسم يملك كتلة ، أو حتى طاقة ــ لأن أينشتين أظهر هذا التكافؤ الموفق ــ يولد في كل نقطة من الفضاء حقلاً ثقالياً . كما أن كل جسم يتحرك حاملاً شحنة كهربائية ، يعين في الفضاء حقلاً كهرطيسياً . غير أن ميكانيك الكم ، لاشأن له مع الحقل الأول ، الثقالي ، نظراً لضآلة كتلة الجسيمات في عالم الصغائر ، وبالتالي ضآلة القوة الخاصة بحقلها الثقالي (وذلك بسبب ضآلة « ثابت الثقالة ») . لذلك لايعالج ميكانيك الكم سوى الحقل الثاني (الكهرطيسي) . إذ تطبق معادلة شرودنجر على حركة الجسيمات المكهربة داخل « كمون » تحدده شحنة نواة الذرة . وكانت خواص الذرة كلها هي خواص كهرطيسية . لذلك قد نتساءل : ألم يكن من الممكن آنذاك السير على منوال الكاهن الذي سافر إلى الأمريكيتين ، فيتحدثون عن النظرية الكهرطيسية للجسيمات ، وهم يعنون بها « ميكانيك الكم » ؟ بلى ، ولكن سرعان ماتبين في واقع الأمر أن الأمور كانت أعقد مما تصوروا وأن ميكانيك الكم كان محدوداً وواسعاً في آن واحد بالنسبة للحقل الكهرطيسي وحده .

أولاً ، كان محدوداً جداً لأنه لم يكن يفسر إطلاقاً الحقل الكهرطيسي نفسه الذي عرض ماكسويل نظريته الكلاسيكية في أروع تركيب عرفه النصف الثاني من القرن الماضي . لذلك كان من الضروري إتمامه (أي إتمام ميكانيك الكم) في هذا الاتجاه،وذلك بتأهيله أولاً لمتطلبات النسبية ، لأن الإلكترونات والفوتونات المعنية بالأمر تتحرك على الأغلب بسرعات كبيرة جداً ، ثم بمحاولة « إكمام » quantification الحقل الكهرطيسي ، أي بتأهيل نظرية مكسويل لمتطلبات الإكمام . وهذا يعني ، إن صح لنا استعمال لغة الغواصة المجازية ، أن ندخل ذلك الجهاز المتقن (أي ميكانيك الكم) الذي أثبت كفاءته في العالم مافوق الكمومي ، إلى داخل العالم الكمومي نفسه (أي عالم الذرة) ، لكي نعالج به الجسيمات الكمومية المشحونة بالكهرباء ، وكذلك الإشعاع الكهرطيسي نفسه الذي اشتهر ايضاً باسم فوتونات . ولكي ينقل مجال عمل هذا الجهاز إلى المجال الأعمق ، كان لابد من إجراء بعض التعديلات عليه ، وهي تعديلات لابد أن يكون ميكانيك الكم نفسه قد أملى خواصها المميزة .

وهكذا أصبح واضحاً كيف أن هذا الأخير (أي ميكانيك الكم) ، لكي يصبح نظرية للذرة والإشعاع الكهرطيسي ، كان لابد له من أن يتطور متجاوزاً ذلك الإطار السابق الذي ظل يمثله حتى ذلك الحين ، والذي لم يكن أكثر من إطار مجرد له مفهوم « ميكانيك » .

ولكن سرعان ماتبين من جهة أخرى أن ميكانيك الكم أوسع كثيراً من أن يطبق في حالة الحقل الكهرطيسي وحده . إذ اكتشفت لدى دراسة النوى الذرية ، جسيمات أخرى وتجليات جديدة للمادة لايمكن أن تنسب إلى خواص الحقل الكهرطيسي ، وإنما يجب أن تنسب إلى حقلين أساسيين جديدين هما ، كما تبين ، نوعان جديدان من حقول التأثيرات المتبادلة بين الجسيمات المادية . فكان لابد ، من الوجهة النظرية ، من دراسة هذين الحقلين على نسق دراسة الحقل الكهرطيسي ، أي في شكلية ميكانيك الكم وفي إطار مفهومه وتصوراته .

لذلك كان لابد للمرحلة التالية من تاريخ ميكانيك الكم وتطوراته من أن تصف هذه الأمور الطارئة المستجدة . فهي أمور مغرية جداً ، حتى لقد أوحت للفيزيائيين بأن أكبر المطامع المجنونة في نظرية الفيزياء قد أوشكت أن تصبح منذ الآن في متناولهم . وأكبر المطامع هذه ، تعني تجميع خواص المادة الأولية كلها في صيغة نظرية واحدة ، أو في حقل أساسي موحد . غير أن شرح هذه التطورات بالتفصيل فيما تبقى لنا من صفحات معدودة هو أمر غير وارد ولامعقول . فأقصى ما نستطيع قوله هو أن السمة الرئيسية لهذه التطورات تظل هي سمة المعالجة الكمومية التي ظلت مبادئها بشكل رئيسي هي تلك التي سبق وصفها والتي اكتشفت في السنوات مابين ١٩٢٤ و ١٩٣٠.ولاغرابة في ذلك ، أليست أبرز الأحداث في أكثر الحكايا الخرافية عنفاً وإثارة هي في النتيجة تلك التي كان أبطال الجيل الأول فيها هم أبطالها وشخصياتها الأولى ؟ ذلك لأن الأحداث اللاحقة ستظل محتفظة بشدة ببصمات هذه الأحداث الأولى . فالأمور تسير على غرار التراجيدية اليونانية ، حيث ترجع الأحداث كلها إلى أوائل الأتريسيويين[١] les

(١) نسبة إلى أتريوس ملك مسينا الذي عرف بكراهيته لأخيه ، فأدت الخصومة بين الأخين إلى أعمال انتقام بين أبنائهما وأحفادهما ، ولاسيمسا أخيل ومينلاوس (المترجم) .

atricides . ومع ذلك فإن الإعلان عن النهايات المفاجئة وعن طبيعتها غير المتوقعة ، هو دائماً محرك إضافي في كل ملحمة أو تراجيديه . ولاتشذ عن ذلك نظريات الفيزياء ، فهي أيضاً تخبئ لنا لحظات توتر وترقب على درب مايحاك في أقاصي بلاد الكم النائية . ثم هناك البناء النظري الذي يحاول أن يُحِلَّ شيئاً فشيئاً نظرية كمومية عامة للمادة محل تراكم كان يحشر مع إطار ميكانيك الكم النماذج النظرية الخاصة التي كانت حتى عهد قريب هي الراجحة . وهنا يبرز السؤال : ترى ، هل سيكون هذا البناء فرصة سانحة لردة وضع مأساوي (هي واحدة من تلك الردات التي عودنا عليها إلى حدما تاريخ الفيزياء) ؟ لذلك سنحاول الآن إعطاء الملامح الرئيسية لهذه التطورات التي طرأت على حكاية الكم التي لاتنتهي ، فهي أكثر التطورات إثارة وتشويقاً .

لقد رأينا كيف استطاعت معادلة شرودنجر أن تصف الخطوط المضيئة المميزة لطيف ذرة الهيدروجين ، فقد كان وصفها لها يفوق بدقته وصف نموذج بوهر بمراحل . ومع ذلك لم يكن في استطاعة هذه المعادلة أن تقول أي شيء عن الخطوط الإضافية التي نحصل عليها عندما نضع غاز الهيدروجين في حقل مغناطيسي ـــ أي مانسميه « مفعول زيمن الشاذ » . لذلك فقد احتاج الأمر في حينها لتفسير هذه الخطوط، إلى إضافة حد جديد إلى حدود معادلة شرودنجر الطبيعية ، وهو ذاك المدعو « حد السبين » الذي صاغه باولي . ولكن ميكانيك الكم تقدم بعد ذلك خطوة هامة إلى الأمام عندما حصل ديراك على معادلة أعم من معادلة شرودنجر بكونها متماشية مع متقضيات الصمود النسبوي[١] . لاسيما أن الحاجة كانت ماسة للحصول على معادلة نسبوية للسيرورات الكومية ، وذلك ليكون بالإمكان معالجة حركات الجسيمات المشحونة (كالإلكترون مثلاً) التي تندفع بسرعة كبيرة جداً ، أو لمعالجة الفوتونات التي تسير بسرعة الضوء . إذ لم يكن التقريب الذي يوفره الزمكان التقليدي كافياً في هذه الأحوال . هذا فضلاً عن أن الطاقات التي تلزم عند عمليات الانتقال (من سوية إلى أخرى) كانت تتطلب مراعاة التكافؤ كتلة ـــ طاقة . وكانت معادلة ديراك تمتاز بأنها تتضمن بشكل طبيعي حدود السبين . بينما أدخل باولي هذه الحدود في معادلة شرودنجر بطريقة

(١) انظر ما قيل عن ذلك في القسم الأول ص ١٤٩ ـــ ١٥١ .

مصطنعة . إلا أن الأمر المزعج في معادلة ديراك هو أنها بالغة التجريد . فقد استبدلت بالدوال الموجية اشكالاً جبرية أعقد منها ، واتخذت من الفضاءات الرباعية الأبعاد مضماراً لنشاطها . فكانت الصيغ الجديدة التي تلعب عليها هذه الأشكال الجبرية لعبة « الحطة نطة[١] » ، هي مادعي بـ « المصفوفات غما » التي أصبحت إحدى الركائز الأساسية في شكلية تمثيل حقول التأثيرات المتبادلة كلها . مما يعني أن هذا الأمر المزعج لم يعد مزعجاً ، لأن الفيزيائيين اعتادوا عليه لدرجة أنهم راحوا يستخدمونه وكأنه إحدى أدوات مطبخهم التي يستعملونها يومياً . حتى ليصح القول إن فيزيائيي الكم ، كتبوا على مدخل بلاد الكم (كما فعل أفلاطون قديماً[٢])الشعار التالي « لايدخلن أحد من هنا ما لم يكن قد تآلف مع المصفوفات غمّا » . وكانت الفكرة الأساسية من إدخال هذه المصفوفات هي التالية: إذا أردنا الحصول على معادلة نسبوية مماثلة لمعادلة شرودنجر، مستنيرين بضوء مبدأ التقابل ، فإن هذه المعادلة يجب أن تكون من الدرجة الثانية . ولكن ميكانيك الكم يتطلب معادلة خطية (أي من الدرجة الأولى)[٣]. فالتوفيق الممكن بين هذين الأمرين يضطرنا لأن نضع مكان العوامل العددية في المعادلة ، مصفوفات من المرتبة الرابعة . وعلى هذا فإن حلول المعادلة سيعبر عنها بطبيعة الحال استناداً إلى هذه الأمثال (العوامل) ، وبالتالي إلى هذه المصفوفات . إذن يتبين لنا بوضوح من هذا المثال ، كيف تسير عملية بناء النظرية التي نبحث عنها . باختصار : إننا نخترع مركبات تلبي بإحكام كل ما نصادفه من المتطلبات الشكلية والعملية . وما تاريخ نظرية الكم بعد هذه المرحلة سوى قصة الأبنية المماثلة المنضطبة القواعد والأصول . ولو تأملنا في هذا التاريخ للاحظنا أن نظرية الكم كلها كانت منذ بدايتها هي عملية بناء تسير في هذا الاتجاه . أي خلافاً لما يؤكده

(١) لعبة يتبادل فيها اللاعبان قفز كل منهما فوق ظهر رفيقه (المترجم) .

(٢) يقال إن أفلاطون كتب على باب أكاديميته « لايدخلن أحد من هنا ما لم يكن مهندساً » (المترجم) .

(٣) للحصول على معادلة شرودنجر ، لابد من إجراء معالجة تعتمد على العلاقة $E = \frac{1}{2} mv^2$ (الطاقة الحركية لجسيم) . حيث E من الدرجة الأولى (علاقة خطية في E) . لكن المعادلة النسبوية المقابلة لها هي $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ التي هي من الدرجة الثانية في E . وهذه المعادلة يمكن جعلها مكافئة لمعادلة من الدرجة الأولى بأن نكتب $E = \alpha m + \beta p$. غير أن α و β لم يعودا عددين عاديين ، بل مصفوفتين ذات أمثال عقدية .

الاختباريون الحسيون الذين يعتقدون أن هذه الصيغ الشكلية قد أملتها علينا الوقائع ، ولاشيء غيرها . ولو أمعنا النظر أكثر أيضاً ، للاحظنا أن جميع النظريات الفيزيائية ، حتى التي سبقت ميكانيك الكم ، هي أبنية شيدت بطريقة مشابهة . ولكنها قطعاً كانت تخضع في كل خطوة لامتحان جديد ، خوفاً من الوقوع فريسة للضلال في غابة الظواهر . إلا أن نظرية الكم تمتاز بأهمية خاصة ، وهي أنها أظهرت لنا بكل وضوح أن الأمور تسير على هذا النحو . لأنه كان من المستحيل ، بكل صراحة ، أن نتخيل ، ولو للحظة ، أن الأشياء التي تعالجها يمكن أن تحاورنا مباشرة . لذلك فقد احتجنا ونحن في غواصتنا إلى الطريقة والأدوات المفهومية واللغوية التي تساعدنا على رؤيتها والتحاور معها : ثم بعدئذ أصبح المنفذ جاهزاً،ومنه وطئنا بكل أمان تربة بلاد الكم .

غير أن الصعوبة الحقيقية في معادلة ديراك ، تكمن في غير هذا المكان . ففي البدء كانت العلاقة التي استعنا بها هي علاقة من الدرجة الثانية . ثم من هذه العلاقة صنعنا معادلة من الدرجة الأولى . ولكن علاقة الطاقة النسبوية ، هي دائماً علاقة من الدرجة الثانية . أي أننا عندما نكون بصدد البحث عن حلول لمعادلة ديراك ، فإننا لن نستطيع التخلص من الحقيقة التالية : وهي أن هناك مقابل كل قيمة موجبة للطاقة ، يوجد حل آخر له نفس القيمة المطلقة من الطاقة ، ولكنه سالب . ولكن سرعان ماتبين أن هذا الأمر المزعج ــ بالنظر إلى عدم وجود أي جسيم حقيقي طاقته سالبة ــ ماهو في الحقيقة إلا باعث مهم جداً على الكشف . فديراك لجأ في بادئ الأمر إلى تمويه العجز في شكليته ، بأن أعطاها تأويلاً عبقرياً سرعان ماتبين أنه مطابق لمعطيات الواقع . وهذا التأويل ، كان على الشكل التالي : لما كان مبدأ باولي في الاستبعاد[1] يطبق على الإلكترونات التي عناها ديراك بمعادلته ، لذلك لجأ هذا إلى اعتبار أن مجموعة الحالات الممكنة للإلكترونات (المزعومة) التي طاقتها سالبة ، كانت كلها مشغولة ، حتى كأنها بحر متراص لايمكن أن يكشف عن شيء إطلاقاً . ولذلك لم يكن باستطاعتنا أن نلاحظ سوى الإلكترونات الحقيقية التي طاقتها موجبه . ولكن ماالذي يمكن أن يحدث لو أن « ثقباً » ظهر لسبب أو آخر في بحر الطاقات السالبه (كأن ينشأ هذا الثقب نتيجة جائحة

(١) انظر ص ٧٩ ــ ٨١ في القسم الأول .

من الطاقة تكفي لاختراق الجبهة نحو الطاقات الموجبة) ؟ هنا قرر ديراك أن هذا الثقب كان سيخصص لجسيم طاقته موجبه ولكنه يتحرك بحركة معاكسة لحركة الإلكترون ، فهو إذاً ذو شحنة مغايرة . وقد ظن ديراك في بادئ الأمر أن هذا الجسيم المعني لايحتاج إلى بحث ، وأنه هو البروتون . ولكنه اضطر فيما بعد إلى ملاحظة أن الواقع يفرض شيئاً آخر (لأن كتلة البروتون أكبر بحوالي ٢٠٠٠ مرة من كتلة الإلكترون) . فكانت الإمكانية الوحيدة المعقولة التي ظهرت واضحة ، وتتفق مع الواقع ، ولاسيما بعد اكتشاف ك.أندرسون Carl D. Anderson عام ١٩٣٢ للبوزيتون ، هي أن كل جسيم يقابله جسيم مناظر له بالشحنة ومطابق له في كل ماعدا ذلك ، وطاقته كذلك موجبه . وقد دعي الجسيم المضاد . ثم ظهر فيما بعد أن هذه الحقيقة عامة ولاتخص الإلكترون وحده . إذ برهن إ.سيجريه Emilio Segré عام ١٩٥٥ على وجود بروتون مضاد . ثم أمكن بعد ذلك رصد جميع الجسيمات المضادة للجسيمات المعروفة فعلاً . بل هناك أكثر من ذلك ، فقد أعطت شكلية نظرية الحقول الكمومية صيغة نظامية مدروسة لهذا التناظر بين الجسيمات وبين الجسيمات المضادة بأن برهنت أن القوانين الفيزيائية تظل صامدة عندما ننتقل من منظومة جسيمات إلى أخرى تبدو كأنها انعكاس للأولى على مرآة فائقة التجريد تعرف باسمها السري PCT[١] ، مهمتها أن تضع مكان كل جسيم في المنظومة الأولى جسيمه المضاد في المنظومة الثانية .

ولكن معادلة ديراك لم تكن حتى ذلك الحين سوى مرحلة في مسيرة انضمام ميكانيك الكم إلى النسبية . وأما لماذا قلت انضماماً وليس اندماجاً ، فلأن هذا الاندماج يبدو الآن إشكالياً إلى حد بعيد . إذ إن المبادئ التي اتخذت أساساً لميكانيك الكم تختلف كل الاختلاف عن تلك التي اتخذت أساساً لنظرية النسبية . فهذه الأخيرة تعبر عن خواص يتصف بها الزمكان ، وتنبني على تحويلات مستمرة ، بينما لاتتحدث الأولى (أي نظرية الكم) عن المكان والزمان إلا مكرهة ، ولاتعترف إلا بتحولات منقطعة ــ كتحولات الطاقة مثلاً. وقد رأينا إلام يؤول حال السببية، التي لاتهتز

---

(١) يرمز لهذه المرآة الخيالية عادة بالأحرف PCT ، حيث P من Parité (التعادلية أو الصنفية) وC من Charge (الشحنة) .

عادة للعواصف ، منذ أول بادرة لجعلها تؤدي دوراً مزدوجاً (نسبويا وكمومياً) لأشياء لايمكن الفصل بينها بالمعنى الكمومي . فعندئذ تتحدث عن عدم وجود ترابط منطقي ، وتحتج بأننا نعين منذ البدء مواصفات الأشياء التي نتحدث عنها[١] .وينتج عن هذه الصعوبة الرئيسية ، أن كل نظرية مبنية ـــ كما هو حال نظرية الحقول الكمومية التي سنتحدث عنها بعد قليل ـــ على النسبية وعلى نظرية الكم ، تكون مستندة إلى ركيزتين مختلفتين بطبيعتهما كل الاختلاف . والغريب في هذه القضية ، هو أن نظرية الحقول الكمومية ، على الرغم من هذا الشذوذ المعماري ، والتشويه في أبسط مبادئ الجماليات ، لاتعاني من أي ضيق أو من سوء الصحة ، بل تستمر في فتوحاتها عبر مسيرتها الظافرة . والمستقبل وحده سيقول كلمته في مثل هذا المصدر غير المتجانس للمعرفة . ولكن مايبدو مضموناً هو أن طبيعة النظرية التي نتحدث عنها ، هي ، في جوهرها ، كمومية . ولكنها تستخدم النسبية على أنها حاجز أمني أكثر من أنها ركيزة مبدئية ، أو على الأقل ، إنها تستخدم النسبية بطريقتها التي لاتخلو من عدم اللياقة ، وهذا مايجب أن نعترف به .

والسبب في ذلك هو أن ماتحتاجه نظرية الكم ، وماتفتقر إليه في هذه اللحظة التي تشغلنا ، هو أن يصبح في مقدورها أن تطوي في شكليتها ـــ أو ، إن صح القول ، أن تجمع في يد واحدة ـــ الإشعاع والذرة على حد سواء . إذ إن معادلة ديراك للأسف تعبر عن حركة جسيم ذري ، ولاتعبر عن إصدار الإشعاع المتولد من قفزة الكترون من سوية للذرة إلى أخرى ، كما أنها لاتشكل نظرية لتحول المادة إلى إشعاع وبالعكس . فهذا التحول ، كان قد ظهر بسرعة فائقة في الفترة تقريباً التي كانت فيها نظرية الكم توشك أن تختم إعدادها . ومن المعروف أن تحولات من هذا النوع تنتج من تكافؤ المادة والطاقة الذي عبر عنه أينشتين بالعلاقة $E = mc^2$. فالفوتون المار مثلاً بالقرب من نواة ذرية ، قد يتحول ، إن كانت طاقته كافية ، إلى زوج : إلكترون ـــ بوزيترون ، وبالعكس فإن البوزيترون المتجول في وسط مادي ، يتفانى بسرعة مع أحد الإلكترونات الذرية التي يصادفها في طريقه ، فيطلق إشعاعاً كهرطيسياً (أي فوتونات) . هذا ، كما أن

---

(١) انظر أيضاً ص ١٤٩ ، ١٥٠ من القسم الأول ، وكذلك ص ٢٠٧ حتى آخر الفصل .

النظرية التي يراد لها أن تكون نسبوية ، يجب أن تضم على قدم المساواة ، الإلكترون والجسيم الذي يوجد هذا الإلكترون في كمونه ـــ كالبروتون مثلاً في أبسط الذرات وهي ذرة الهيدروجين . لذلك ، ولتلبية هذه المطالب كلها ولدت بالتدريج نظرية الحقل الكهرطيسي الكمومية ـــ التي تدعى أيضاً الإلكتروديناميك الكمومي .

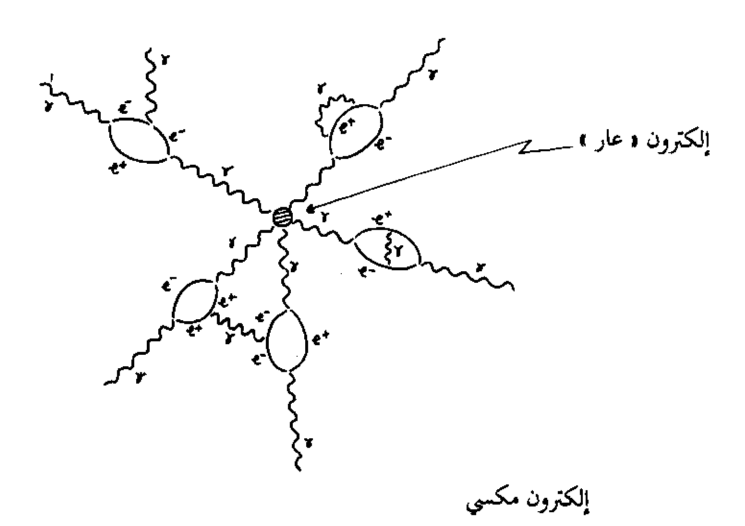
وهكذا ازدهرت نظرية الحقل الكمومية بصفتها عملاً لاحقاً يكمل مباشرة النظرية التي وضعها ديراك ، فكان تقدمها بوجه خاص على يد هيزنبرغ ، باولي ، جوردان ، فيجنر . وقد تكونت هذه النظرية من تعميم النظرية الكمومية على منظومات ذات أعداد مختلفة متغيره من الجسيمات ، وذلك بالاستعانة بشكلية رياضية قادرة على تمثيل ظهور جسيم كمومي أو اختفائه . وبهذه الطريقة أمكن جعل الجسيمات والإشعاع على قدم المساواة ـــ كما أمكن بهذه الطريقة تفسير أعقد التحويلات المتبادلة بين الجسيمات (كالإلكترونات) وبين الإشعاع الكهرطيسي . إلا أن الإلكتروديناميك الكمومي الذي تشكل من إكمام حقل ماكسويل ، كان يعاني عيباً وهو أنه يظهر في حساب بعض الكميات حدوداً غير منتهية . وعندما كانت تجري المحاولات لإخفاء هذه الكميات غير المنتهية ببعض الحيل المختلفة ، كانت تنبؤات النظرية تعثر بالحساب على النتائج المشاهدة فعلاً . إلا أن هذه الصعوبة (أي وجود كميات غير منتهية) بدت كأنه لاعلاج لها ، حتى لقد أوشك البعض أن يقول إن نظرية الحقل الكمومية غير صالحة . لذلك قدمت محاولة أخرى تسمى طريقة « المصفوفة S » . وهذه المحاولة تعطي نتائج مفيدة ولكن في ميدان آخر غير ميدان الإشعاع ـــ وهو ميدان التأثيرات المتبادلة القوية التي سنتحدث عنها قليلاً بعد حين . أما في ميدان المادة والإشعاع ، فقد تبين أنها غير قادرة على أن تحل محل النظرة التي ساقها الحدس .

وفي عام ١٩٤٧ ظهر اكتشاف كان في استطاعته تدمير نظرية الحقل الكمومية تدميراً نهائياً ، لولا أنه ظهر ، في حقيقة الأمر ، على العكس ، فرصة طيبة لنهضتها ، ونعني به مفعول لامب Lamb ، وهو انحراف أحد خطوط طيف ذرة الهيدروجين عن القيمة التي أعطتها الحسابات النظرية : إذ سرعان ماتبين أن هذا الشذوذ ناشئ عن حدوث تأثير متبادل بين الإلكترون الذري من جهة ، وبين الأزواج الافتراضية

المرافقة لحقله الكهرطيسي الخاص من جهة أخرى . وهذه « الأزواج الافتراضية » **المتضمنة أصلاً في عبارة الحقل** ، يتألف كل زوج منها من الكترون ـــ بوزيتون، وهي بالتحديد ، الاصل في نشاة الكميات اللانهائية . إذ إن « علاقة الارتياب » الرابعة في ميكانيك الكم بين الطاقة المتبادلة في عملية ما ، وبين الفترة الزمنية التي يتطلبها هذا التبادل ، تعطينا مبرراً لأن نفهم كيف أن زوجاً من هذه الأزواج يمكن أن يتولد فعلاً وبصورة تلقائية ، ولكن بشرط أن يتم ذلك في فترة زمنية لايتجاوز طولها حداً معيناً[١] . ونقول هذا ، لا على سبيل التلاعب الشكلي ، بل إن « الفراغ الكمومي » يحوي فعلاً مثل هذه الأزواج الافتراضية . وقد أطلق على هذا المفعول إسم « استقطاب الفراغ » . إذ إننا سنجد الإلكترون دائماً وهو يتبادل التأثير من شحنة أحد عنصري الزوج الافتراضي ، بحيث أن الإلكترون الكمومي لايبدو « عارياً » أبداً ، بل تحيط به حاشية ، أو قل غيمة من الأزواج الافتراضية التي تقطب المحيط المجاور له مباشرة ، وتعدل ، نتيجة لذلك ، مستويات طاقته (شكل ٢ ـــ ٧) . فإذا أخذنا هذا المفعول بالحسبان ، أمكن التوصل إلى حساب انحراف « لامب » بدقة فائقة جداً . وقد اكتشف كرامرز Kramers وبيث Bethe في بادئ الأمر ، ثم توموناغا Tomonaga وشوينجر Schwinger وفاينمان Feynman طريقة رياضية صرفة للخلاص من الكميات اللانهائية . وتدعى عمليات الخلاص هذه « إعادة التطبيع » renormalisation أو إعادة الاستنظام ، وهي تعتبر كتلة الإلكترون وشحنته الفيزيائية هي تلك التي للإكترون « المكسو » (أو المحاط بالحاشية) ، وليست تلك التي للإلكترون « العاري » . إذ إن هذا الأخير لا وجود له في الحقيقة ، لأنه لايمكن تصور إلكترون دون حقله . ولما كانت الكميات اللانهائية ، تظهر في حساب غيمة الجسيمات الافتراضية التي تحيط بالإلكترون العاري ، لذلك يجب أن نفرض أن الإلكترون العاري والغيمة لهما كميات مميزة لانهائية تتفانى مثنى مثنى لكي تعطي الحدود الفيزيائية المنتهية التي نشاهدها . وهنا لابد من التنبيه إلى أمرين حول طريقة إعادة التطبيع :

---

(١) تكتب علاقة الارتياب المعنية بالشكل $\Delta E . \Delta t \geq \hbar$. واعتماداً على هذه العلاقة ، نناقش الوضع على الصورة التالية : تدل هذه العلاقة على أنه من الممكن أن يحدث تأرجح قدره ΔE للطاقة خلال فترة زمنية أقصر من تلك التي يتطلبها تعيين ΔE و Δt معاً ، أي أقصر من $\frac{\hbar}{\Delta E}$ (ولدينا كذلك علاقات الارتياب الثلاث الأخرى ، المكانية ، الموافقة للسابقة ، وهي من الشكل $\Delta x . \Delta p \geq \hbar$.



الشكل ٢ ــ ٧

الالكترون « المكسو » بالأزواج الافتراضية التابعة لحقله الكهرطيسي الخاص : إن الالكترون العاري (الممثل بنقطة المركز) محاط في حقيقة الأمر بفوتونات افتراضية (وهي ممثلة بخطوط متعرجة) . وهذه الفوتونات تتحول إلى أزواج افتراضية يتألف كل منها من إلكترون ــ بوزيتون (وهي ممثلة بعقد) . فمجموعة تحويلات هذه الجسيمات الافتراضية وتأثيراتها المتبادلة ، تغير من وصف الإلكترون « المكسو » على هذه الصورة . وهذا التعديل هو التعديل الموافق « لإعادة التطبيع » أو الاستنظام ، ونخص بالذكر أن « البوزيتونات »ذات الشحنة الموجبة ، تجذبها الشحنة المركزية (كما أن الإلكترونات ، بالعكس ، مدفوعة مبعدة) الأمر الذي يؤدي إلى نقص في شحنتها الفيزيائية الظاهرية ، ويجعلها منتهية ومساوية لوحدة الشحنة الكهربائية .

الأولى هي أن هذه الطريقة ليست اليوم سوى طريقة مصطنعة ، أو رياضية بحتة ، ولاعلم لنا أبداً بأي صورة فيزيائية مناسبة يمكن أن تمثلها . والعجيب في الأمر هو أن استخدامها أظهر خصوبة وعطاء يفوق الخيال ، إذ إن التحقق التجريبي من الحسابات المتقدمة جداً في الإلكـترودينـاميك الكمومي ، أظهر دقة عديمة المثـال[١] . والثـانيـة هي أن إعادة التطبيع ، طريقـة ممكنة ، لأن كم الحقل الكهرطيسي ، له كتلة معدومة ، مما يجعل هذا

(١) مثـال ذلك أن العزم المغناطيسي « الشـاذ » للإلكترون ، الذي يتنبأ به الإلكترودبناميك الكمومي في عملية حساب تقريبها من « المرتبة السادسة » هو التالي :

$$ae^{th} = (1\ \ 159\ 655{,}4 \pm 3{,}3) \times 10^{-9}$$

والقيمة التقريبية التي قيست ، كانت :

$$ae^{th} = (1\ \ 159\ 655\ 7 \pm 3{,}3) \times 10^{-9}$$

الحقل يتمتع بالخاصة المسماة « صمود المعايرة » وهي خاصة أصبحت ذات شأن عظيم منذ أن وجدت في صميم التطورات الحديثة .

ولكن ما قلناه عنها ، كان قليلاً ــ وقليلاً جداً ــ مفضلين ، ربما ، وبلا مسوغ ، أن تتجه حكايتنا نحو نظرية الكم للحقل الكهرطيسي . في حين أن هناك حقولاً أخرى . بل إن كل ما هو جيد في المشاريع الحديثة ، يتركز بالتحديد على بحث هذه الحقول ودراستها بإمعان . وقبل أن نعرض هذه المآثر عرضاً إجمالياً ، دعونا نضع خاتمة لمجال الذرات الذي يشمل جميع خواص المادة التي تشكل هذه الذرات لبنات في بنيتها . بمعنى أن الفيزياء الذرية ، هي حقاً وصدقاً الفيزياء بمعناها الحصري ، كدراسة أطياف الذرات ، والكيمياء ، وفيزياء الحالة الصلبة (أو المادة المكثفة) ، فهي الآن لها نظريتها ، أي نظرية الإلكتروديناميك الكمومي التي تسمو بقدرتها التنبؤية على كل نظرية أخرى . ففي كل يوم يتجمع العديد من الاختبارات الباهرة المؤكدة لصلاحية هذه النظرية . وهي تعتمد في ذلك على نظرية الميكانيك الكمومي الذي قامت عليه .

دعونا نرجع الآن لبرهة قصيرة إلى العهد الذي كنا نرى فيه ميكانيك الكم قائماً على أسس صلبة ، أي إلى زمن الثلاثينيات ، يوم كان عدد الاختبارات التجريبية التي تدعمه يتزايد باستمرار . فحينذاك كانت تنكشف أمام التحريات ، مجالات جديدة تقع دون مجال الذرة من حيث أبعادها ، وهي مجالات النوى والجسيمات الأولية التي تنشط فيها القوى النووية والنشاط الإشعاعي . ولكننا لن نستطيع أن نلح هنا على كل ما تم من اكتشافات مشوقة باهرة في هذا المجال ؛ لأن هذا قد ينسينا بوفرته خط السير في حكايتنا . فلنكتفِ بأن نشير كيف كانت الدراسات الأولى للخواص النووية هي في الوقت نفسه انتصاراً عظيماً لتطبيق فكرة الكم (أو بالأحرى انتصاراً لفكرة « المفعول النفق » الذي يفسر آلية النشاط الإشعاعي ألفا على أساس أن هناك إمكانية لجسيم يدعى ألفا بأن يخرج من بئر للطاقة عميقة جداً ، وهذا الخروج لايتم إلا لأن النشاط « غير محدد » وخاضع للاحتمالات) . وهي أيضاً لحظة خوف عظيم بسبب هذه الأفكار . إذ إن قوى النواة والنشاط الإشعاعي ، بدت فعلاً في بادئ الأمر مقطوعة الصلة مع كل ما كان معروفاً (أو مثبتاً) من قبل . غير أن جسيمين منقذين ظهرا إلى النور في ذلك الوقت

لنجدة تصوراتنا (وآرائنا الراسخة) المعرضـة للخطر ، وهما النوترينو (وكان آنذاك مجرد فرضية) ، وقد افترض وجوده لتفسير التفكك بيتا النشيط إشعاعياً ، والثاني هو النوترون (وهو حقيقة واقعة) . وكانا مع البوزيتون ومع الموزون بي (الذي ظهر بعد عدة سنوات كجسـيم تبـادل للقـوى النووية) مقدمة طليعيـة لحشـد مؤلف من عدة مئـات من الجسيمات . فهذه الأخيرة ، أمكن توليدها باستخدام مسرع للجسيمات حرض « الغيوم الافتراضية » الشهيرة لجسيمات الذرة والنواة ، أي تلك الجسيمات التي صادف أن كانت موجودة بالقوة (أو بشكل كموني) ضمن حقل الذرة والنواة . (وقد حدث ذلك ، بوجـه خـاص ، في الخمسـينيـات والستينيـات من هذا القرن) . ويمكن تصنيف هذه الجسيمات بحسب ميزاتها التي يعبر عنها بجلاء بأشكال رياضية (شحنة كهربائية ، سبين ، إيزوسبين ، عدد لبتوني ، عدد باريوني إلخ ، ويضاف إلى هذا : الغرابة ، السحر ، وأمور أخرى أغفل عن ذكرها) . وعلى كل حال فإن نظرية زمر التحويلات التي ساعدت على ربط هذه الجسيمات بعضها ببعض في لوحة تصنيفية واحدة ، أعطتنا آنذاك فكرة أن هذه الجسيمـات ،ليست ، بشكلها الرياضي ، سوى تجميع لبعض الكائنات البسيطة التي كان عددها في البدء ثلاثة ، ثم (حالياً) ستة ، ونعني بها الكواركات . وقد تبين في هذه المرة الأخيرة عندما سُبر غور الجسيمات تجريبياً ، أن الصياغة الرياضية المذكورة أعلاه ، تغطي فعلاً خاصة فيزيائية ، وأن الجسيمات ــ أو على الأقل تلك التي تعرف باسم هادرونات ــ هي فعلاً مؤلفة من هذه الكواركات . أما الجسيمات الأخرى ــ أي تلك التي لم تكن هادرونات ــ فقد دعيت **لبتونات** . وكانت ، كالكواركات ، ذات بنية بسيطة . بمعنى أنها جسيمات توحي بكل مظاهر النقاط المادية البسيطة ، أو مراكز لقوى هي تأثيرات متبادلة أساسية . ويجدر بنا أن نضيف إلى هاتين الطائفتين صاحبنا القديم : الفوتون ، الذي لم يعـد يسعى وحده في سهول الكـم الواسعـة ، بل أخذت ترافقـه بعد الآن كوكبـة من (السعـاة) أو ناقلي الرسـائل الأسـاسيـة المؤلفـة من ثلاثة **بوزونات وسيطة** ، **وثمانية غلويونات** (انظر الجدول رقم ١) . وإذا ما صادف أن اقترب هذا الموكب من المناطق الحارة ، حيث تتجلى الطـاقات العالية ، عندئذ ينضم إليهم فرسـان آخرون مؤلفون من

جدول ١ : الجسيمات الأولية

I ــ سوية أساسية

أ ــ فرميونات مولدة للحقول : كلها ذات سبين $\frac{1}{2}$

١) الكواركات

ــ ٦ كواركات u, d, s, c, b, t (مرتبة من اليمين إلى اليسار بحسب تناقص الكتل) .

ــ خواصها : الشحنة الكهربائية + $\frac{2}{3}$ (u, c, t)؛ − $\frac{1}{3}$ (d, s, b): الشحنة الباريونية : + $\frac{1}{3}$. توجد ثلاث حالات متمايزة للون (واللون بالنسبة للتأثير المتبادل القوي ، الأساسي ، مكافئٌ للشحنة الكهربائية للحقل الكهرطيسي) .

ــ ميزاتها : لاتظهر حرة (إنها متجاورة في المادة النووية) ويؤثر بعضها في بعض بقوى التأثيرات المتبادلة الأربعة (القوية ، الضعيفة ، الكهرطيسية ، الثقالة) .

٢) اللبتونات

ــ ٦ لبتونات : $\nu_e, e^-, \nu_\mu, \mu^-, \nu_\tau, \tau^-$

ــ خواصها : شحنة كهربائية صفر $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ ، −١ (e^-, μ^-, τ^-). الشحنات اللبتونية (ثلاثة أنماط من الشحنات e, μ, τ)

ــ الميزات : توجد حرة . كتلة النوترينوات هي (صفر ؟) لايؤثر بعضها في بعض عبر الحقل القوي (كما أن النوترنيوات لاتتبادل التأثير مع الحقل الكهرطيسي) .

ب) كم الحقول : كلها ذات سبين صحيح

١) الغرافيتون (الحقل الثقالي)، سبينه ٢ ، كتلته صفر، مداه لانهائي، شحنته الكهربائية معدومة. لم يشاهد حتى الآن (لايزال وجوده افتراضياً محضاً) .

٢) البوزونات الوسيطة (الحقل الضعيف). سبينها ١ ، كتلتها حوالي ٨٠ مرة من كتلة البروتون. مداها حوالي $١^{-١٥}$ إلى $١٠^{-١٦}$ توجد في ثلاث حالات من حيث الشحنة الكهربائية : −١ (W^+)، صفر (Z^0)؛ −١ (W^-) من المفروض أن تشاهد قريباً .

بوزونات تقوم بمبادلة قوى جديدة(١) . غير أننا أصبحنا هنا في أجواء التأمل القصية الشاهقة الارتفاع .

(١) بحسب نظريات لاتزال مجرد فروض ، ينضم إلى هذه الجسيمات ، جسيمات أخرى تدعى اللبتو ــ كواركات إذ إنها ، بمعنى أوضح ، تجمع بين خواص اللبتونات والكواركات معاً .
(يتحدثون اليوم عن جسيمات هيجز (نسبة إلى W.Higgs) وهي جسيمات مولدة لحقل سلمي هو حقل كتل ، أو هي بوزونات مولدة لكتل . انظر مجلة العلوم ، عدد أغسطس/آب ١٩٨٩ ، ويتحدثون كذلك عن التناظر الفائق : انظر العلوم . ك١/١٩٨٧ .

٣) الفوتون (الحقل الكهرطيسي). سبينه ١. كتلته صفر. مداه لانهائي. شحنته الكهربائية صفر. مشاهدته شائعة

٤) الغلويونات (الحقل القوي). سبينها ١. كتلتها صفر. مداها حوالي $١٠^{-١٣}$ سم شحنتها الكهربائية معدومة. توجد في ثمان حالات متمايزة من « اللون ». لاتظهر حرة (متجاورة دائماً في المادة النووية) .

II ـــ سوية الجسيمات التي يقال عنها « أولية »

هذه الجسيمات ، هي إما جسيمات من السوية « الأساسية » (I) ، الموجودة حرة (لبتونات ـــ كموم الحقول باستثناء الغلويونات) ، وإما « الهادرونات » المؤلفة من كواركات وغلويونات. وتتوزع هذه الهادرونات بين :

١) موزونات (كوارك مضاد وكوارك وغلويونات). سبينها صحيح أو صفر

٣) باريونات (٣ كواركات مع غلويونات). سبينها نصف صحيح. من بينها: النوكليونات أي النوترون (المؤلف من الكواركات udd) والبروتون المؤلف من (uud).

III ـــ السوية النووية

تتألف النوى من الجسيمات الهادرونية ذات السوية السابقة : باريونات وموزونات . مثال ذلك ، نواة الدوتريوم : يمكن أن تعتبر بروتوناً ونوتروناً مرتبطين بتبادل موزون .

IV ـــ السوية الذرية

الذرات مؤلفة من نوى، ومن إلكترونات وفوتونات

V ـــ السوية الجزيئية

الجزيئات مؤلفة من تجمع ذرات مرتبطة بالكتروناتها وفوتوناتها .

ولكي نفهم على الوجه الأفضل هذا الدور الصامت الذي تقوم به الجسيمات وبوزونات المبادلة ، علينا أن نقول كلمة عن الحقول التي تروجها هذه الجسيمات .

ففيما عدا الحقل الثقالي الذي لم نقل عنه شيئاً حتى الآن ، لعدم أهميته بالنسبة لجسيمات عالم الصغائر ، وكذلك فيما عدا الحقل الكهرطيسي (الذي لايتحكم في ميدان الذرة فحسب ، بل كذلك في خواص الجسيمات المترابطة بشحنتها

الكهربائيـة) هناك حقلان آخران يتجليان حصراً في المناطق الصغيرة جداً في الفضـاء المحيط بالجسيمات . إذ إن مدى قواهما قصير جداً ـــ حوالي ١٠$^{-١٢}$سم ومادون ـــ أي بعكس الحقـلين الآخرين (الثقـالي والكهرطيسي) اللذين مداهما لانهائي . والسبب في قصر مداهما هو أن الجسيمات النـاقلة لهمـا ، هي بوزونات مبـادلة شبيهة بفوتون الحقل الكهرطيسـي وغرافيتون الحقـل الثقالي (الذي ينتظر اكتشـافه) ، إلا أن كتلتها ليست معدومة ، بل كبيرة نسبياً . ولكن كلما كانت بوزونات المبادلة أثقل كان مداها أقصر ، الأمر الذي يفسر لنا لماذا لم يكتشف حقلا التأثيرات المتبادلة هذان ، إلا بعد تأمل وتحرٍ عميقين في عالم الصغائر . فأولهما ، ويدعى حقل التأثيرات المتبادلة القوية ، مسؤول عن القوى النووية وعن تماسك النوى . وأما الثـاني ، الذي يسمى حقـل التأثيرات المتبادلة الضعيفـة ، فهو مسـؤول عن تفكك النوى المشع ، بيتا ، وعن تفكك عدد كبير من الجسيمات . وفيما كان الإلكترودىناميك الكمومي يتطور ، كان هذان الحقلان ، يبدوان غير قابلين لأن يعـالجا بالطريقـة نفسهـا (كالكهرطيسية) ، والسبب الرئيسي في ذلك ـــ على الأقل بالنسبة للحقل الضعيف ـــ هو أن كموم الحقل (أي البوزونات الناقلة) ، لايمكن أن تكون كتلتها معدومة على غرار الفوتون ، فالحقل الضعيف لايمكن أن يكون صـــامد معـــايرة ، ولايمكن أن تطبق عليـه التحويلات التي سمحت بحذف الكميـات اللانهائية . وهذا هو السبب الذي جعل العلماء يظنون ، ولزمن طويل ، أن وضع نظرية للمادة الأولية في إطار نظرية الحقول الكمومية لايمكن أن يكون حلاً لمشاكلنا . لذلك راحت المحاولات تمضي في سبـل مختـلفة متباينة ، متخلية نهائياً أو إلى حد ، عن فكرة الحصول على صياغة نظرية مشتركة لمجمل الظواهر كلها . فكانت تكتفي بوضع نظريات تقريبيـة ، أو نماذج مربكة التعقيد والدراسـة تقع ضمن إطار ما أثر عن هيزنبرغ وعن ميكانيك الكم (حول الأشياء التي يمكن ملاحظتها) ، فلا تطمح إلى أكثر من استنساخ ما يمكن ملاحظته . ولكن هذا لايعني أن هذه الفترة لم تكن خصبة معطاءة حتى وإن لم تبدُ مثيرة مشوقة كالبحث عن نظرية أساسية . ففي حالة التأثيرات القوية ، شهدت هذه الفترة تطور « نظرية البث » المفيدة جداً ، وتطور نظرية « المصفوفة S » ، وكذلك تطور

جميع أنواع النماذج الظاهراتية التي يمكن أن « تعقلن »[1] ، خواص الجسيمات والتأثيرات المتبادلة بينها ، وذلك بتجميعها كلها معاً في نظرية واحدة[2] . وقد نشاهد بعض هذه النماذج فيما بعد ، وعلى الأرجح في إطار نظرية أساسية تكون مرتبطة فيها بشكلية عامة ، وعندئذ سيستفاد منها ، على كل حال كتقريبات مفيدة .

بل إن نماذج مثمرة ، كانت تزدهر من مكان إلى آخر على هذه الدروب الصعبة ، وكأنها شجيرات صبار نادرة متباعدة ، فكانت بمثابة أمارات تبشر بمقدم مناطق خصبة معطاءة . وكانت هذه النماذج في بادئ الأمر ، هي نتائج الأعمال الرياضية الجافة التي كانت بعيدة كل البعد عن المسائل الحقيقية في الفيزياء التجريبية ، ولكن لم يلاحظ (في البدء) أنها كانت ـــ على غرار الطيور التي أشار إليها مراقب سفينة كريستوف كولومبوس ـــ تعلن عن ظهور قارة جديدة . والمقصود هنا بهذه القارة ، هو نظريات المعايرة ليانغ Yang وميلز Mills . ولكن س . وينبرغ Steven Weinberg ، وعبد السلام ، لاحظا في عام ١٩٦٧ و١٩٦٨ أنه إذا طبقت هذه التصورات والأفكار على حقل التأثيرات المتبادلة الضعيفة ، فإن ذلك يؤدي إلى نظرية بسيطة ورشيقة تعالج في الوقت نفسه الحقلين الضعيف والكهرطيسي . والحق ، أن فكرتهما لم تكن تنقصها الجرأة . ولنحكم على ذلك بأنفسنا : لقد كانا يعالجان هذين الحقلين وكأنهما كلاهما يراعيان تناظر المعايرة ، أو بعبارة أخرى ، كانا يفترضان أن كتلة البوزونات الناقلة للحقل الضعيف هي صفر ! ولكن جميع البينات التي كانت في حوزتهما ، كانت تشير إلى عكس ذلك ، أي إلى أن هذه البوزونات يجب أن تكون ثقيلة إلى حد مقبول . ولكن لابأس ، ماذا يهم ! إن مشكلتهما محلولة ، فقد أزمعا على اعتبار أنْ ثمة آلية « كسر تلقائي في التناظر » (أنظر الشكل ٨) تتدخل خلسة ، بمجرد أن يتم توحيد الحقلين ، فتمنح بوزونات الحقل الضعيف كتلة كبيرة ، في حين يحافظ الفوتون على خفته الأصلية . وهنا نجد الفيزيائيين

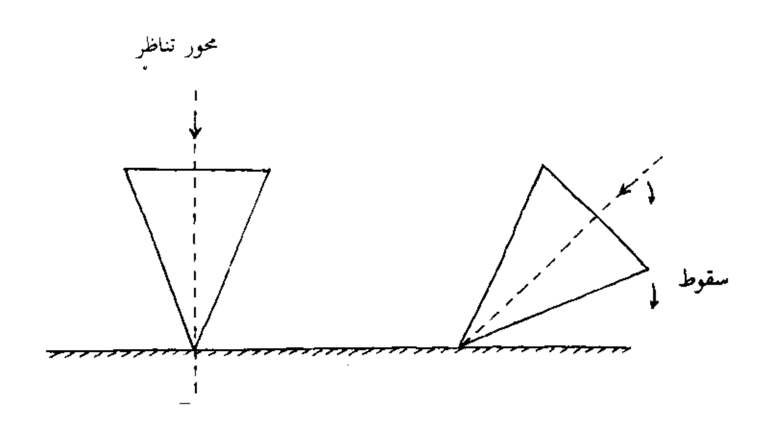
(١) ترجمة لكلمة rationaliser . بمعنى : تضفي صفة العقلانية الرياضية بحيث تستنتج الحقائق بدءاً من مقدمات (المترجم) .

(٢) حول هذه النظريات راجع مجلة العلوم ، عدد حزيران/يونيو ١٩٩٠ (المترجم) .

يمنحون أنفسهم قسطاً من الحياة السهلة ، فهم يصنعون من العدم أشياء كثيرة (لقد رأينا فيما سبق كيف أظهروا من الفراغ أزواجاً من الجسيمات وكأنها سرب من الطيور قد انبثق من قبعتهم) . ومع ذلك ، لو بحثنا جيداً ، لوجدنا أن هناك فعلاً آلية من هذا النوع ، قادرة على تغيير مقادير الكتلة في قلب حقل الجسيمات . وهذه الآلية تشتهر بإسم مخترعها هيجز Higgs . إن انكسار التناظر هذا ، عندما يعطي كتلة للبوزونات التي هي واسطة التأثيرات المتبادلة الضعيفة ، فإنه يشطر في الوقت نفسه الحقل الموحد الكهرضعيف إلى حقلين لهما خواص متمايزة ، وهما الحقل الكهرطيسي ، والحقل الضعيف . وبعد عدة سنوات ، اي في عام ١٩٧١ ، برهن ج . هوفت Gerht't Hooft أن هذه النظرية قابلة للتطبيع (للاستنظام) ، مثلها في ذلك مثل الحقل الكهرطيسي نفسه ، بمعنى أن إعادة التطبيع ، التي هي خاصة من خواص حقول المعايرة التي تنقل تأثيراتها بوزونات كتلتها صفر ، لن تفسد نتيجة انكسار التناظر الذي « أفسد معايرة » الحقل بأن جعل كمومه ، أي بوزوناته ، ثقيلة وذات كتلة . وعلاوة على ذلك ، فقد تنبأت النظرية الكهرضعيفة بآثار تجريبية أمكن اكتشاف بعضٍ من أهمها بعد وقت قصير (فقد اكتشفت في عام ١٩٧٣ ، التيارات الحيادية للتأثيرات المتبادلة الضعيفة ، ثم العدد الكمومي لـ « السحر » عام ١٩٧٤[١] . كما ينتظر اكتشاف تنبؤات أخرى على نحو مفاجئ . فهناك العديد من النظريين والمجربين الذين يهيئون أنفسهم لاستقبال البوزونات الرسولة[٢] ، الثقيلة جداً ، بما يناسب « مقامها الرفيع » (فكتلتها تساوي ٨٠ مرة تقريباً من كتلة البروتون) . كما يهيئون أنفسهم لاستقبال جسيمات هيجز . وهكذا فإن أراضي المناطق القديمة الفاصلة ، المغطاة بأوراق الصبار الجافة ، أصبحت ، منذ اليوم ، خضراء تملؤها الطرائد . وترى الباحثين فيها ، كالهنود الحمر في مكامنهم ، يطاردون ثلاثة بوزونات ثقيلة ترعى بسكينة وهدوء في السهول الخصبة اليانعة .

(١) الأمر الذي أتاح لعدد من العلماء : وينبرغ ، غلاشوف ، وكذلك ريختر Richter وتينغ Ting أن ينالوا جوائز نوبيل .

(٢) أي البوزونات الوسيطة ، أو بوزونات حقل التأثيرات المتبادلة الضعيفة (المترجم) .



الشكل ٢ ــ ٨

مثال بسيط عن « انكسار التناظر التلقائي » : لو حاولنا أن نركن مخروطاً على رأسه فوق طاولة ، لما ظلّ متوازناً ، لأن توازنه القلق « ينكسر » لأي سبب ضئيل (تلقائي) يدخل لاتناظرية خفيفة . ولكن هذه اللاتناظرية تتضخم عند حركة سقوط المخروط .

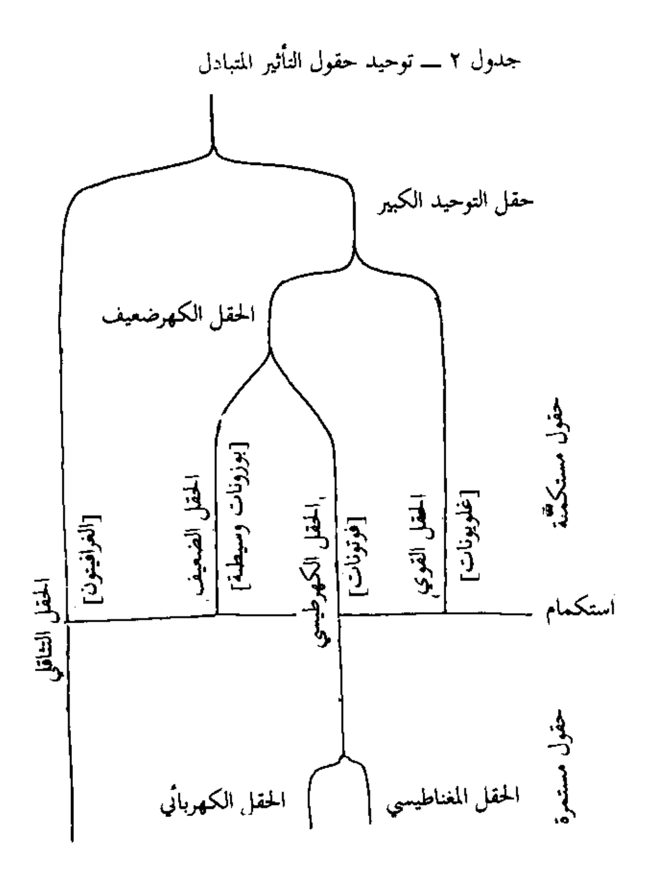
فمـا تم بـالنسبـة للحقـلين : الكهـرطيسـي والضعيف ، كان عمـلاً عظيماً . ولكن مـاذا بشـأن حقـل التـأثيرات المتبـادلة القوية ؟ إن الوضع فيهـا كان يبدو ميئوسـاً منه ، وذلك لأسباب يطول شرحها ، ولكنها مرتبطة بالشدة الخاصة بهذا الحقل . فهذه الشدة ، هي بحيث أن « إعادة تلبيس »[٢] الجسيم (الذي هو من نوع الهادرونات التي سبق ذكرها) تحت تأثيرها ، هي عملية لانهاية لها ، وشأنها في الأهمية شأن الجسيم نفسه . بمعنى أنه من المستحيل أن تعالج المشكلة « كما تعالج الاضطرابات » ، أي بتقريبات متتالية ، مع أن هذه الطريقة هي أحد الشروط المطلوبة لتطبيق نظرية الحقل . ولكن

(٢) أي بحاشيته أو غيمته من أزواج الجسيمات الافتراضية (المترجم) .

الأمور تبدلت لحسن الحظ في غضون السبعينيات ، عندما تأكد أن الجسيمات الهادرونية مؤلفة من كواركات . لأن هذه الأخيرة لها خاصتان غير مألوفتين : الأولى خاصة المتاخمة ، وهي تحكم على الكواركات بالبقاء طيلة حياتها — أو حتى الأبد — محبوسة داخل الجسيمات . (ولكن ما نريد الحديث عنه هنا ليس المتاخمة ، فهذه قصة مجنون ، مليئة بالاستفهامات) . أما الخاصة الثانية غير المألوفة ، فهي تجعل من الكواركات نقيض الإلكترونات تقريباً (أو بوجه أعم ، نقيض اللبتونات) . فالإلكترون يشتد جذبه للجسيمات المشحونة كلما كان أقرب إليها ، في حين أن هذه الخاصة في الكواركات ، التي تدعى خاصة « الحرية المقاربة » ، فتنص على أنه كلما اقترب جسيم من أحد الكواركات التي تؤلف البروتون ، تتناقص شدة تأثيره المتبادل معه أكثر من قبل ، بمعنى أن غيمة الكوارك الافتراضية تميل شيئاً فشيئاً إلى التلاشي . لذلك يكفي أن يكون كواركان متقاربين أحدهما من الآخر تقارباً كافياً ، حتى يكون التأثير المتبادل بينهما ضعيفاً ، وعندئذ يمكن معالجته « كما يعالج الاضطراب » ، الأمر الذي يتطلب أساليب الحساب الوحيدة التي نعرف استخدامها في مجال نظرية الحقول الكمومية . وعلى هذا النحو ، تكون العقبة الرئيسية قد اختفت وأصبح من الممكن تصور نظرية كمومية لحقل التأثير المتبادل القوي . كما عزي للكواركات نوع من الشحنة الخاصة التي دعيت **اللون** (وهي كمية مجردة ، ولاصلة لها أبداً بلون الرسامين ، مثلما أن **السحر** الذي تحدثنا عنه سابقاً ، غريب كلياً عن سحر فينوس الميليه Vénus de Milo فلن نتساءل هنا بعد الآن عن سبب هذه التسميات الغريبة) . وقد أدى الأمر إلى القول بأن التأثيرات المتبادلة القوية تتولد من صخب ثمان غليونات gluons (وهي بوزونات ناقلة للون) تلصق الكواركات وتخلط بعضها مع بعضها وكأنها عمال كلفوا بلصق الإعلانات وهم سكارى . « فحقل اللون » يمكن معالجته بطريقة مماثلة لطريقة معالجة الحقول السابقة . وهكذا أصبح إنجاز هذا البناء الجريء المعقد أسهل الآن ، ولكن اختباره تجريبياً ليس بالأمر السهل أبداً .

ولكن ما أهمية ذلك مادامت القصة لن تتوقف هنا . فالبحارة الذين تراءت لهم هذه الميزة الجمالية (ميزة التوحيد) ، وتنسموا عبير جزرها الفردوسية ، لم يعد ثمة ما يوقف خيالهم الجامح المتحفز ، وأصبح من الطبيعي أن يحلموا بتوحيد حقل

جدول ٢ — توحيد حقول التأثير المتبادل



اللون القوي من الحقل الكهرضعيف ، وبذلك يبدأ مشروع « التوحيد الكبير » ، ففي هذا التوحيد تصبح الحقول كلها حقلاً واحداً ينتظمه تناظر عام يكفي أن يكشفوا عن شروطه ، وبعد ذلك يلقون باللوم على عبقرية الكسر الخبيثة بأنها هي التي كسرت المرآة وقطعت أوصال التناظر ، فتمايزت الحقول . بل قد يحلمون بما هو أبعد من ذلك ، فيضمون إلى الحقول الثلاثة السابقة حقل الثقالة (انظر الجدول ٢) . وهذا ليس ببعيد ، فالفيزيائيون ، على الرغم من أنهم يمثلون أحلامهم بدساتير ، إلا أن أحلامهم تصبح في بعض الأحيان حقيقة واقعة . وهذه النظرية ليست جمالية فحسب ، بل هي قادرة على التنبؤ ، ومن تنبؤاتها أن البروتون مستقر ، ولكن بشكل نسبي ، بمعنى أن متوسط عمره

كبير جداً يبلغ 10^{32} سنة أو أكثر . الأمر الذي يضمن لنا أننا سنعيش فترة إحالتنا على التقاعد بكل هدوء وطمأنينة . بل يضمن كذلك عمر الكون الذي يعد فتياً بالنسبة للبروتون . فعمره حتى الآن 10^{10} سنة . أما التنبؤات الأخرى ، فهي تحكي عن المستويات النائية جداً من الطاقات التي لايمكننا بلوغها . ولكن ، لعلها ليست خارج متناولنا كلياً . فبدلاً من أن ننظر إلى أمام ، أي نحو المنشآت المستحيلة التحقيق للمسرعات ذات الطاقة العملاقة الجبارة التي هي ضرورية لاختبار هذه التنبؤات — إذ إن التناظر الشامل لحقل التأثيرات المتبادلة ، لن يعثر عليه إلا في جوار الطاقات الخيالية المذهلة التي تبلغ حوالي 10^{20} إلكترون فولت — أقول ، لماذا لانتجه صوب ماضي الكون الموغل في القدم ، فحينها كانت هذه الطاقات بالتحديد هي السائدة آنذاك بحسب ما تعلنه نظرية الكموسمولوجية القائلة بأن الكون بدأ ذرة وانفجرت .

وهنا أرى كأن الدوار بدأ يصيبنا ، فدعونا نتساءل بيننا وبين أنفسنا : ترى ألا يخشى أن تتحول هذه الرحلة في غواصة عالم الصغائر الذي يعج بالكموم ، إلى غرق في تخوم الكون النائية ، فندفن فيه كلنا مع أسرار قصته الأسطورية ؟ من يدري ؟!.. هذه قصة لاتنتهي ، فليس أمامنا ، إلا أن نطوي كتابها هنا ، ولكن إلى حين .

ملحـق

نظرية الكم والواقع

لقد اتضح الآن ، أن القول بأن العالم مؤلف من أشياء مستقلة بوجودها عن شعور الإنسان ، هو قول يتعارض مع ميكانيك الكم ومع الوقائع التي أثبتتها التجربة .

ب . ديسبانيات ★

يفترض في كل نظرية ناجحة في العلوم الفيزيائية ، أنها تعطي تنبؤات صحيحة ، فلا تخطئ في تحديد نتائج أي تجربة حين تكون هذه التجربة واضحة الخطوات والهدف ، أو على الأقل في تحديد قيم احتمال نتائجها الممكنة كلها . إن ميكانيك الكم ، إذا نظرنا إليه من هذه الزاوية ، نجد أنه لامفر من الحكم عليه بأنه نظرية ناجحة إلى حد بعيد . لأنه يزودنا بطرق تساعد على حساب نتائج التجارب في ميادين عديدة . منها مثلاً : النظرية الأساسية الحديثة للذرات ، للجزيئات ، للجسيمات الأولية ، للإشعاع الكهرمغنطيسي ، للأجسام في حالتها الصلبة ... الخ .

ولكن ثمة شيء آخر يطلب من النظرية ، بوجه عام ، غير تأكيد التجربة لها . فنحن لا نتوقع منها فحسب أن تحدد نتائج تجربة ما ، بل نريدها أيضاً أن تساعدنا على فهم الحوادث الفيزيائية التي يفترض أنها كامنة خلف النتائج الظاهرة . أو بعبارة أخرى ، لا يكفي أن تعطي النظرية قيمة العدد الذي سيتوقف عنده مؤشر آلة القياس ، بل يجب

★ «The Quantum Theory and Reality»: Bernard d' Espagnat _
مجلة Scientific American عدد November عام 1979

ان تشرح لماذا يتوقف المؤشر عند هذا الوضع . وهنا تبرز بعض الصعوبات في إطار تصورات نظرية الكم فيما لو رحنا نطلب منها إعطاء معلومات من هذا القبيل . ففي ميكانيك الكم يُمَثَّل الجسيم الأولي ، وليكن الإلكترون مثلاً ، بعبارة رياضية تدعى دالة الموجة . وهذه الأخيرة ، غالباً ما تصف الإلكترون بأنه منتشر على مساحة واسعة من الفضاء .

إن هذا التمثيل ، لا يتعارض مع التجربة ، بل على العكس ، إنه يعطي تقديراً صحيحاً لاحتمال وجود الإلكترون في أي مكان نشاء . ومع ذلك ، حين يكتشف الإلكترون في لحظة ما ، فإنه لا يكون منتشراً ، بل له دائماً وضع محدد . وهكذا ، فإنه ليس واضحاً تماماً ما هو التفسير الفيزيائي الذي يجب إعطاؤه لدالة الموجة ، أو ماهي صورة الإلكترون التي يجب وضعها في الذهن . لذلك ، وبسبب هذا الغموض ، يرى العديد من الفيزيائيين أن النظر إلى ميكانيك الكم على أنه مجرد مجموعة من القواعد المفيدة لوصف نتائج التجارب ، هو الموقف الأكثر معقولية . فنظرية الكم ، تبعاً لهذا الموقف ، لا تهتم إلا بالظواهر الملاحظة (أو الوضع الملاحظ للمؤشر) ولا يعنيها ماوراء ذلك من وضعية فيزيائية (كوضع الإلكترون الحقيقي) .

* * *

ولكن ، حتى هذا الموقف القنوع ، لاينال رضى الجميع كما اتضح الآن . لأن ميكانيك الكم ، حتى لو نظرنا إليه على أنه ليس أكثر من مجموعة قواعد ، فإنه يظل متعارضاً مع نظرة أخرى إلى العالم لا يزال يأخذ بها أناس عديدون يرونها واضحة أو طبيعية . وتقوم هذه النظرة إلى العالم على ثلاثة افتراضات ، أو أوليات ، يجب التسليم بها دون برهان . أولاها ، وهي الواقعية ، تقول إن انتظام الظواهر الملاحظة ناشئ عن واقع فيزيائي معين مستقل عن الإنسان المراقب . والثانية ، تؤكد أن الاستدلال الاستقرائي هو طريقة سليمة للبرهان ، ويمكن تطبيقه بحرية ، بحيث يمكن الوصول إلى استنتاجات مشروعة من ملاحظات متسقة . والثالثة ، وتدعى انفصاليه أينشتين ، أو موضعية أينشتين ، تقرر أنه ما من تأثير ، مهما كان نوعه ، يمكن أن ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء . إن هذه الأوليات الثلاث التي غالباً ما افترض أن لها مكانة الحقائق التي لا ترد ،

أو حتى الحقائق الواضحة بذاتها ، تشكل الأساس الذي بنيت عليه النظريات (الكلاسيكية) التي سأدعوها نظريات الطبيعة الموضعية الواقعية . وقد توصل أينشتين وبعض تلاميذه من هذه الأوليات ، إلى تنبؤ أكيد واضح بالنتائج المترتبة على صنف من التجارب يتناول فيزياء الجسيمات الأولية . في حين أن ميكانيك الكم يتوقع لهذه التجارب نتائج تختلف اختلافاً خطيراً ذا دلالة كبيرة عن نتائج أينشتين وجماعته . لذلك ، إما أن النظريات الموضعية الواقعية خطأ ، وإما أن نظرية الكم هي الخطأ .

في بادئ الأمر ، لم تكن التجارب التي تصورها أينشتين وجماعته سوى « تجارب فكرية » بحته تجرى في الخيال فحسب . إلا أن بعض الباحثين تصوروا لها شكلاً آخر سمح لهم بأن يضعوها منذ سنوات قليلة موضع التنفيذ بواسطة تجهيزات حقيقية . ومع أن نتائجها لم تأت كلها متسقة إحداها مع الأخرى ، إلا أن معظمها كان يدعم توقعات ميكانيك الكم . ويبدو الآن أنه ما لم تفسر هذه النتائجَ أحداثٌ خارقة ، فإن توقعات ميكانيك الكم هي الصحيحة . فمن شبه المؤكد بالتالي أن النظريات الموضعية الواقعية هي الخطأ . غير أن الأوليات الثلاث التي بنيت عليها هذه النظريات ستظل أساسية بالنسبة للتفسير الفطري الشائع للعالم ، ولن يتخلى عنها معظم الناس إلا مكرهين . ومع ذلك ، فإن إحداها على الأقل ، كما يبدو ، لا بد من هجرها أو تعديلها أو حصرها بشكل ما ضمن شروط معينة .

وتدور التجارب المشار إليها أعلاه (التي تصورها أينشتين وجماعته) حول الروابط القائمة بين أحداث متباعدة وبأسباب هذه الروابط . افرض مثلاً أن هناك جسيمين أحدهما على بعد امتار قليلة من الآخر ، ووجد أن لهما قيمة واحدة من خاصة معينة ، كالشحنة الكهربائية . فإذا صحت هذه النتيجة مرة واحدة أو عدداً قليلاً من المرات ، يمكن صرف النظر عنها باعتبارها مصادفة فقط . ولكن إذا اكتشفت هذه الرابطة باستمرار أو بعد قياسات عديده ، فعندئذ يجب إيجاد تفسير مدروس لها . ولا يختلف الأمر عن ذلك إذا كانت الكميتان المقيستان متعاكستين بدلاً من أن تكونا قيمة واحدة ، فالرابطة عندئذ تكون سلبية ، ولكنها لا تقل شأناً عن سابقتها بشيء ، كما لا يحتمل أن تكون مجرد مصادفة .

وحين يقال عن رابطة مؤكدة بين حوادث كهذه إنها مفهومة ، لا غموض يحيط بها ، فإن معنى ذلك دائماً أن هناك تفسيراً لها يستشهد بارتباطات سببية . فإما أن أحد الحادثين يسبب الآخر ، أو أنهما معاً ناشئان عن سبب مشترك . ولا يمكن أن يقنع العقل قبل أن يكتشف هذه الارتباطات ، بل لن يهدأ ما لم تصبح لديه معرفة جاهزة بقواعد اختبارية للتنبؤ بروابط مستقبلية . فالرابطة بين المد والجزر وبين حركة القمر مثلاً اكتشفت منذ زمن قديم ، كما وجدت قواعد للتنبؤ بحركات المد والجزر اعتماداً على تجارب سابقة . ولكن لا يمكن أن نقول إن حركات المد والجزر أصبحت مفهومه إلا بعد أن أتى نيوتن بنظريته عن الثقالة .

والحاجة إلى تفسير الروابط المشاهدة ، ملحة ، تدفعنا أحياناً إلى افتراض وجود سبب مشترك لها حتى حين لا يكون خلف الرابطة نفسها مايوضح هذا السبب . وهذه ، على كل حال ، طريقة يمكن دائماً تبريرها ، وهي المخرج الأساسي من التعارض بين ميكانيك الكم وبين النظريات الموضعية الواقعية ، حيث الروابط التي هي موضوع الخلاف هي روابط بين مشاهدات حول الجسيمات تحت الذرية ، علماً أنه لا يمكن الاستغناء في هذا المجال عن الوصف الميكانيكي الكمومي مع كل ما يصاحبه من مخاطر إبيستيمولوجية[1]. على أن توقعات النظريات الموضعية الواقعية يمكن توضيحها ، وذلك بالرجوع إلى كيفية تفسير الروابط عن بعد في السياق الأكثر ألفة (اليومي المعتاد) ، والذي لا تدعو فيه الحاجة إلى إدخال نظرية الكم .

* * *

لنفرض أن أحد علماء النفس صمم اختباراً بسيطاً ، وأن كل شخص خضع فيه للفحص لابد أن ينجح أو يفشل ولامجال للالتباس في النتائج ابداً . فعالم النفس سيجد أن هناك أناساً ينجحون وأناساً يفشلون ، ولا يعرف مايميز بين الفئتين سوى نتيجة اختبارهم نفسها . أو بعبارة أخرى ، إنه لا يستطيع أن يعرف هل يقيس الاختبار مؤهلاً أو صفة حقيقية عند من تقدموا للامتحان أم أن النتائج تأتي كيفما اتفق الأمر .

(١) أي مخاطر من التعرض لنقد طريقة البحث والاستنتاج . لأن الإبيستيمولوجية تدرس طرائق العلوم وتبين السليم منها والخطأ .
(المترجم)

إن هذه المســألة ليس لها حل عام كما يبدو ، ولكنها قد تحل في حالة خاصـة . افرض مثلاً أن الاختبـار لم يتقرر لسـلسـلة من الأفراد ، بل لسـلسـلة من الأزواج مع زوجاتهم ، وأنه اكتشف وجود رابطة قوية بين اجاباتهم (وهذا ما يمكن كشفه بفصل الأزواج عن زوجاتهم ، قبل الاختبار ، ثم إجراء الاختبار للفئتين وهما منفصلتان) . ثم عند تحليل النتائج وجدنا أن قسماً من الجماعة قد نجح وقسماً قد رسب . وأن الزوجة تكون ناجحة في حال نجاح الزوج وراسبة في حال رسوبه .

فـإذا استمـرت هذه العـلاقـة بعـد اختبـار عدد من الأزواج مع زوجـاتهم ، يصبح عالم النفس واثقاً تقريباً من استنتاجه بأن إجابة كل مفحوص لا تأتي اعتباطاً ساعة الاختبار ، بل على العكس ، لابد أن الاختبار يكشف بذلك عن خاصة أو صفة حقيقية عند المفحوصـين . ولابد أن هذه الخاصـة كانت حاضرة سـلفاً عند المفحوصـين قبل اختبارهم ، بل قبل فصلهم في الحقيقة . وقد يكون للمصادفة أثرها في نشوء الخاصة ، ولكن الأزواج والزوجات لا يملكون كلهم عندئذ هذه الخاصة ، ولابد أن هذا الأثر قد وقع في زمن ما قبل فصل الأزواج عن زوجاتهم . ففي هذه الحالة فقط ، عندما يكون الأزواج والزوجات لايزالون معاً ، يمكن أن يكتسبوا بعض السمات التي يمكن أن تدفعهم بعدئذ للإجابة بطريقة واحدة وبشكل متسق . وهكذا تفسر العلاقة بإرجاعها إلى سبب مشترك سابق للاختبار .

وهنـاك تفســير آخر لابد من استبعـاده عند الوصـول إلى هذه النتيجـة وهو احتمال أن يكون كل زوج وزوجته قد اتصل أحدهما بالآخر في أثناء الاختبار . ولكن لو كانت هناك وسيلة صـالحة للاتصال ، لما كانت هناك حاجة للبحث عن وجود صفة مسبقة ، ولأمكن لأي من الزوجين ، كان قد تقدم للاختبار أولاً ، أن يعد إجابة لا على التعيين ، ثم يرسل تعليماته للآخر ، وبذلك يخلق الرابطة الملاحظة . غير أن التحفظ من وقوع مثل هذا المحذور عند إجراء اختبار نفسي ، ليس صعباً ، فعلى أبعد تقدير يمكن جعل الاختبارين متقاربين جداً في الزمن ، بالإضافة إلى فحص الأزواج والزوجات في موضعين متباعدين بحيث لا يمكن لأي إشارة أبطأ من الضوء أن تصل في وقت تكون فيه ذات فائدة ما .

وحين يقرر عالم النفس أن الاختبار قد قاس خاصة حقيقية عند الأفراد ، عندئذ ينتقل إلى مرحلة تالية ، فيقوم باستدلال استقرائي كما يلي : إذا شكل الأزواج مع زوجاتهم ، الذين خضعوا للاختبار ، عينة غير مميزة (غير منحازة) من جمهرة أزواج ، وأدت هذه العينة إلى بعض المعايير الاحصائية القياسية ، عندئذ يمكن لعالم النفس أن يستدل بأن كل زوج مع زوجته مأخوذين من العينة نفسها ، إما أن يمتلكا معاً أو لايمتلكا معاً الخاصة المقيسة بالاختبار . كما يمكن لعالم النفس أن يستنتج اعتماداً على المبدأ نفسه أن كل عينة واسعة وغير مميزة من الأزواج مع زوجاتهم لم يجر عليها الاختبار بعد ، سيكون بعض الأزواج مع زوجاتهم لهم هذه الخاصة ، وبعضهم لا . وتقرب الثقة بهذا الحكم من اليقين كلما زاد حجم العينة . وعندئذ يستدل على كلا الأمرين ، أي على وجود الارتباط داخل الأزواج وعلى وجود الاختلاف بين الأزواج ، حتى في قسم الجماعة الذي لم يجر عليه أي اختبار بعد .

إن هذه الاستنتاجات ، تقوم على الأوليات الثلاث نفسها التي تشكل أساس النظريات الموضعية الواقعية . فالواقعية ، فرض لا غنى عنه لكل إنسان يرى أن عليه أن يعتقد بأن بعض الاختبارات على الأقل تقيس فعلاً خواص راسخة موجودة بمعزل عن المجرب. وقد كانت ضرورية لفرض صلاحية الاستدلال الاستقرائي، أي لكي يتم الانطلاق من البيانات الملاحظة إلى تعميم نتائجها بعدئذ على جزء الجماعة الذي لم يخضع بعد للاختبار (أي لإجراء عملية تمليس خارجي **extrapolation**) . أما الانفصالية فكانت مشمولة بالفرض القائل إن كل زوج وزوجه خاضعين للاختبار ، لا يمكن أن يتصل أحدهما بالآخر . وهنا ، إذا فرضنا أن الاختبارين قد أجريا معاً ، بحيث أن أي إشارة تنتقل بين الأزواج والزوجات لابد أن تنتشر بسرعة أعلى من سرعة الضوء (لكي تكون مفيدة) فإن فرضنا يكافئ انفصالية أينشتين .

فمن هذه التجربة الافتراضية في علم النفس ، يتضح أولاً : أن النتائج تستخلص من البيانات الملاحظة . إلا أن الابيستيمولوجي يمكن أن يصر على أن هذه النتائج غير مؤكدة . ولاسيما أن الباحث المتمرس في أسس ميكانيك الكم ، يمكن أن يحاجج بأن ليس ثمة ضرورة منطقية للتسليم بالأوليات الثلاث في حجة عالم النفس . وفي

هذه الحالة لا ضرورة لأن نستنتج أن هناك رابطة بين الأزواج والزوجات سابقة للاختبار ، أو أن هذه الاختلافات كانت قائمة بين الأزواج وزجاتهم قبل إجراء أي اختبار . ولكن عالم النفس ميال لأن يجد هذه الاعتراضات مضحكة ، وأنها تعبر عن شك ليس في محله أو تعبر عن تعلق غير علمي أبداً بالمفارقات . ومع ذلك يوجد في أدبيات ميكانيك الكم اثباتات عديدة مشابهة أو مكافئة بالشكل لهذا البرهان وكلها تستهدف إظهار أن لا حاجة لأن تكون الارتباطات والاختلافات موجودة قبل قياسها .

إن ميكانيك الكم يتميز بسمة فريدة ، هي أنه يتنبأ بوجه عام باحتمال وقوع حادث لا بالتأكيد على أن هذا الحادث سيقع أم لا . ذلك أن دالة الموجة التي تصف حركة جسيم أولي ، تُفَسَّر غالباً تفسيراً احتمالياً . واحتمال إيجاد الجسيم في نقطة ما ، يتناسب مع مربع دالة الموجة في هذه النقطة . ويمكن لدالة الموجة أن تنتشر أحياناً ، كما ذكرت أعلاه ، على منطقة واسعة . مما يعني أن الاحتمال يمكن أن يتوزع توزعاً متناثراً . فلابد ، إذا ما أجري القياس فعلاً في نقطة اخترناها ، أن نجد الجسيم فيها ، أو لا نجده ، ويقال عندئذ إن دالة الموجة تنهار . لنفرض مثلاً أن الجسيم قد اكتشف (في النقطة) ، فالقضية الابيستيمولوجية الشاغلة عندئذ هي : هل كان هذا الوضع المعين هو وضع الجسيم طيلة الوقت حتى قبل إجراء القياس ؟.

لو أمكن تحويل استنتاجات عالم النفس إلى هذا المجال ، لاقتضى ذلك أن تستنتج أن وضع الجسيم كان معيناً تماماً منذ البدء، وبالتحديد، أي مثلما تبين أن الصفة المكتشفة عند بعض أفراد الجماعة ، كانت موجودة قبل إجراء الاختبار عليهم . فطبقاً لهذه الحجة ، لم يكن وضع الجسيم أبداً غير معين بل كل مافي الأمر أنه كان مجهولاً لدى المجرب .

* * *

ولكن هذا ما لا يوافق عليه معظم المشتغلين في نظرية الكم باستثناء واحد من بين الفيزيائيين هو أينشتين ، فقد بقي طيلة حياته غير راض عن الصفة الاحتمالية التي اضفيت بوجه عام على تفسيرات ميكانيك الكم . وكان أقوى نقد وجهه إلى هذه

التفســيرات يقوم على حجة تشبه إلى حد ما تلك التي نسبتها لعالم النفس . ففي عام ١٩٣٥ نشر أينشتين بحثاً مع اثنين من معاونيه ، هما ب . بودولسكي Boris Podolsky ون . روزن Nathan Rosen كشف فيها عن اعتراضاته بوضوح . فهو لم يتمسك بالقول إن نظرية الكم خطأ ، بل على العكس ، لقد قدر أن بعض تنبؤاتها على الأقل لابد أن تكون صحيحة ، إلا أنه كان ينادي بأن وصف ميكانيك الكم للطبيعة ليس كاملاً ، أو بالأحرى إنه تقريبي ، وأن حركة الجسيم ، إذا لزم الأمر أن توصف بعبارات الاحتمالات ، فلا لشيء ، كما حاول تبيانه ، إلا لأن بعض المتغيرات (الوسيطات) التي تعين الحركة لم تكن بعد قد حددت ، ولو عرفت قيم هذه « المتغيرات المستترة » الافتراضية ، لأمكن تعيين المسار تعيينا كاملاً .

وقد طُرح في حينــه عدد من الحجج المنــاهضـــة لمقـولة أينشتـين ، ولكن لن اذكر منها الآن سوى واحدة ، وهي التي تستند إلى معيار الفائدة . فهي تقول أنه لا أهمية للمتغير الخفي أن يوجد أو لا ، كما لا أهمية في أن يكون هناك فرق أو لا ، قبل الاختبار ، بين كل زوج وزوجته . فحتى لو وجدت هذه المتغيرات (الوسيطات) فإنها لن تدخل ضمن إطار نظرية تفسير المشاهدات الموجودة . فلنا أن نقول إذاً أن ليس لوجودها معنى علمي . وهنـاك ثلاثة وقائع يبرر انضمامهـا استبعـاد هذه المتغـيرات الخفية . أولها ، أن الشكلية الرياضية للنظرية تكون أبسط فيما لو تجاهلنا وجود أي متغير (وسيط) خفي . والثـاني ، أن هذه الشكـلية البسيطة تتوقع النتائج التي تؤكدها التجربة . والثالث ، أن إضافة هذه المتغيرات الخفية للنظرية لن تكشف لنا عن توقعات إضافية يمكن تحققها . وهكذا فإن القول بوجود هذه المتغيرات بعيد عن متناول التجربة ، وهو مسألة من مسائل الميتافيزياء لا الفيزياء .

فهـذا الدفـا ع عن تـأويـل نظـريـة الكـم تـأويـلاً احتماليــاً ، هو دفـا ع يرفض المتغيرات الخفية باعتبارها فرضاً زائداً أو ربما كان في النهاية عديم المعنى . غير أن تطورات نظرية حديثـة العهد ، برهنت أن المشكـلة حالياً غير ذلك تماماً . إذ إن فرضية وجود متغـيرات خفيـة يمكن أن تؤدي فعلاً إلى توقعات تجريبية مختلفة عن توقعات ميكانيك الكـم . فنظريات المتغير الخفي ، أو النظريات الموضعية الواقعية ، تضع بوجه عام حداً

للمدى (أي للفاصل الزمكاني) الذي يمكن أن يصح فيه ترابط بعض الحوادث المتباعدة . بينما يتوقع ميكانيك الكم عكس ذلك ، إذ يتوقع في بعض الظروف أن يصح هذا الترابط على مدى متطرف جداً . وعلى هذا ، لابد أن يكون ممكناً ، من حيث المبدأ على الأقل ، تحضير اختبار تجريبي يحسم الأمر بين النظريتين .

* * *

لنفرض أن أحد الفيزيائيين ، حضر اختباراً يمكن إجراؤه على جسيمات تحت ذرية كالبروتونات مثلاً . وبعد عدد من التجارب وجد أن بعض البروتونات تحقق الغرض وبعضها الآخر يخفق . ولكنه لا يعرف أهو يقيس خاصة حقيقية للبروتونات أم أنه يلاحظ فحسب تقلبات لا ضابط لها في جهازه . فجرب علاوة على ذلك ممارسة هذا الاختبار على ازواج البروتونات بدلاً من الفرادى ، بحيث أن كل بروتونين مشكلين لزوج ، يبدأان في حالة تجاور محكم ، ويحصل عليهما المجرب معاً بطريقة محددة تماماً ولا تختلف من زوج لآخر . ثم يسمح لهما بالانفصال ،، وبعد أن يتحركا متباعدين مسافة ملموسة (ماكرويه) يجري عليهما الاختبار معاً وفي آن واحد بالنسبة لبعض الأزواج ، وبفاصل زمني بين البروتونين بالنسبة للأزواج الأخرى . وهنا يكتشف الفيزيائي وجود رابطة سلبية صارمة ، وهي أنه كلما نجح أحد البروتونين في الاختبار ، أخفق الآخر فيه قطعاً .

ففي وضع الفيزيائي هنا ، أوجه شبه واضحة مع عالم النفس الذي يجري اختباره على الأزواج مع زوجاتهم ، كما يمكن تطبيق البراهين نفسها على نتائج التجربة الفيزيائية . فإذا كانت الواقعية واستخدام الاستقراء بحرية وانفصالية أينشتين ، كلها أوليات مسلم بها ، فإن الفيزيائي محق عندئذ في أن يستنتج أن اختباره يقيس فعلاً خاصة حقيقية للبروتونات . ولكي تكون الرابطة مفسرة ، لابد أن تكون الخاصة موجودة قبل أن ينفصل بروتونا أي زوج ، كما لابد أن تكون لها قيمة محدده منذ ذلك الحين وحتى القيام بعملية القياس . وفوق ذلك ، إذا هيئت أزواج إضافية من البروتونات بالطريقة نفسها ، فإن الفيزيائي يعرف أن أحد البروتونين سيكون له ، في كل حالة ، هذه الخاصة والآخر لا ، حتى ولو لم يجر الاختبار فعلاً على أي بروتون .

ولكن هل ثمة اختبار فعلي يمكن أن ينفذ على جسيمات تحت ذرية لتبيان نتائج مماثلة كهذه ؟ الجواب : يوجد ، وهو قياس مركبة من مركبات سبين جسيم على طول محور اختياري . والسبين الذي نعزوه لجسيم تحت ذرى ، هو شيء يشبه (مع مراعاة بعض الأمور) سبين العزم الزاوي لجسم كبير كالأرض مثلاً . وعلى كل حال ، لا يحتاج الأمر في ظروف هذه الدراسة للدخول في تفاصيل الكيفية التي يعامل بها السبين في ميكانيك الكم ، بل يكفي أن نشير إلى أن سبين أي جسيم يمثل بمتجه أو بسهم يمكن أن نتصوره مرتبطاً بالجسيم . إن مسقط هذا المتجه على أي محور في الفضاء الثلاثي الأبعاد ، هو مركبة هذا السبين على المحور . وهناك خاصة مثبتة للبروتون (ولعدة جسيمات أخرى) ، ولكنها برغم ذلك ليست مدهشة ، وهي أنه مهما كان المحور الذي نختاره ، فإن قياس مركبة السبين عليه ستأخذ إحدى قيمتين فقط ، نقول إن إحداهما موجبة والأخرى سالبة (بينما يعطي قياس مركبة من مركبات سبين الأرض نتائج مغايرة لذلك تتعلق بمنحى المركبة . إذ يمكن أن يعطي أي قيمة بين الصفر وبين العزم الزاوي الكلي للأرض) .

وقد لوحظ وجود رابطة سلبية لا تشذ أبداً بين مركبتي السبين عندما يؤلف كل بروتونين معاً تكويناً كمومياً يدعى « الحالة الأحادية » Singlet State . أو بعبارة أخرى ، إذا أتيح لبروتونين في الحالة الأحادية أن ينفصلا ثم قيست مركبة السبين نفسها للبروتونين معاً ، فإن هذه المركبة ستكون دائماً سالبة في أحدهما وموجبة في الآخر . وليس لتوقعنا « أيَّ البروتونين ستكون له المركبة السالبة وايهما له الموجبة » أي مدلول معروف . ولكن الرابطة السلبية مثبتة تماماً . وللمجرب أن يختار أي مركبة يشاء دون أن يخلف ذلك أي أثر في النتيجة ، بشرط أن يقيس المركبة نفسها للجسيمين . كما لا يهم أبداً إلى أي مدى تجول البروتونان قبل إجراء القياس مادام لم يعانيا أي تأثير اضطرابي في أثناء سيرهما . كتأثير جسيمات أخرى أو إشعاعات .

* * *

لا وجود للتعارض في هذا القياس البسيط بين توقعات ميكانيك الكم وبين

توقعات النظريات الموضعية الواقعية . ولكن عندما تكون التجربة أكثر تعقيداً إلى حد ما ، يظهر تعارض .

فنحن نعلم أن المتجه الذي يمثل السبين ، يتعين بمركباته على ثلاثة محاور في الفضاء (لا حاجة لأن تكون متعامدة مثنى مثنى).. وفي حالة متجه مقترن بجسم كبير مألوف في حياتنا اليومية ، يمكن للمرء أن يفترض هذا المتجه شيئاً مادياً ، كما أن لديه سبباً مقنعاً لأن يفرض أن مركباته الثلاث لها دائماً قيم محددة . نعم ، قد تكون إحدى المركبات مجهولة ، ولكن لا يمكن أن تكون غير محددة . غير أن هذا الافتراض يصبح حالاً موضع ارتياب حين يطبق على سبين أحد الجسيمات ، فهو بالفعل مستبعد في تأويل ميكانيك الكم تأويلاً احتمالياً ، باعتباره مثالاً يشير إلى نظرية الوسيط (أو المتغير) الخفي . والمشكلة هي أنه لا يمكن تصميم تجربة ، حتى من حيث المبدأ ، يمكن أن تعطينا معلومات حول قيم المركبات الثلاث كلها معاً ، فالأداة الواحده ، لا تقيس سوى مركبة واحده فقط ، وعندما تقوم بذلك تتبدل بوجه عام قيم المركبات ، لذلك ، لكي نعرف قيم المركبات الثلاث ، علينا أن نجري ثلاثة قياسات بالتتالي ، فإلى حين انتهاء الجسيم من الأداة الثالثة ، يكون قد مضى وقت كافٍ لتتغير مركبات السبين ، فلا تبقى هي نفسها التي دخل بها الجسيم إلى الأداة الأولى .

إذن لاتوجد أداة يمكنها أن تقيس أكثر من مركبة واحدة للسبين دفعة واحدة . بل يمكن صنع وسيلة يسهل إحكامها لقياس مركبة السبين على طول اي محور من ثلاثة محاور نختارها كيفما نشاء . وسأشير إلى هذه المحاور بالأحرف C, B, A ، وأدل على نتائج التجارب بما يلي : إذا كانت مركبة السبين على المحور A موجبة نسميها A^+ ، وإذا كانت مركبة السبين على B سالبة نسميها B^- وهكذا . والآن ، يمكن للفيزيائي أن يهيئ كمية كبيرة من البروتونات وهي في الحالة الأحادية . وسيجد أنه إذا قاس المركبة A لكلا البروتونين في كل زوج (أحادي الحاله) ، فإن بعض البروتونات يكون لها A^+ والأخرى لها A^- ، ولكن في كل مرة يكون لأحد البروتونين A^+ يكون للآخر A^- . ولو قرر بدلاً من ذلك قياس المركبة B ، للاحظ الرابطة السلبية ذاتها دائماً ، أي كلما كان لأحد

البروتونين B^+ يكون لرفيقه B^- . وكذلك C^+ يرافقها C^- للآخر . ولا تتوقف هذه النتائج أبداً على طريقة توجيه المحاور C, B, A .

ويجدر بنا أن نشدد هنا على أنه مامن بروتون يخضع في هذه التجارب لقياس أكثر من مركبة سبين واحدة . ومع ذلك ، إذا قبل الفيزيائي بمسلمات النظريات الموضعية الواقعية ، فإن باستطاعته أن يصل من هذه المكتشفات إلى بعض النتائج حول قيم المركبات الثلاث كلها ، متبعاً في ذلك برهاناً مماثلاً لبرهان عالم النفس الذي تحدثنا عنه . إذ باستطاعته أن يستدل في حال اعتبار كمية جديدة من أزواج البروتونات التي هي في الحالة الأحادية ، والتي لم يجر عليها بعد قياس السبين (أو ربما لن يجري عليها أبداً مثل هذا القياس) ، أقول باستطاعته أن يستدل أنه في كل زوج هناك بروتون له الخاصة A^+ والآخر له الخاصة A^- وكذلك يمكنه أن يستنتج أنه ، في كل زوج ، هناك بروتون له الخاصة B^+ والآخر له الخاصة B^- ، وواحد له الخاصة C^+ والآخر له الخاصة C^- .

* * *

إن هذه النتائج ، تقضي بتوسيع دقيق ومرهف ، بل ومهم ، للمعنى الذي أعطي لكل رمز من قبيل A^+ . ففي حين أن A^+ كان سابقاً مجرد نتيجة لقياس أجري على الجسيم ، فقد تحول ، نتيجة لهذه الحجة ، إلى صفة للجسيم نفسه . أو بوضوح أكثر ، إذا كان ثمة جسيم لم يجر عليه القياس ، ويتصف بخاصة أن القياس على المحور A يعطيه القيمة المحددة A^+ ، فإن هذا الجسيم عندئذ يقال إن له الخاصة A^+ . أو بعبارة أخرى ، إن الفيزيائي يكون قد وصل بذلك إلى تلك النتيجة ، وهي أن كلا البروتونين في أي زوج لهما دائماً مركبتا سبين محددتان . وقد تكون المركبات مجهولة ولا يستطيع الفيزيائي بالتالي أن يقول أي البروتونين في الزوج له الخاصة A^+ وايهما له الخاصة A^- إلا بعد إجراء القياس على المحور A ، ولكنه يستطيع بالاعتماد على مسلمات النظريات الموضعية الواقعية ، أن يحاجج بأن قيم المركبات محددة تماماً حتى وإن لم يجر أي قياس . إن وجهة النظر هذه تتعارض مع التأويل الاحتمالي لميكانيك الكم ، ولكنها ليست متعارضة مع أي واقع طرح حتى الآن .

ولكن الرابطة السلبية الصارمة بين بروتونين في الحالة الأحادية ينحصر توقعها في حالة قياس مركبة السبين نفسها لكلا البروتونين. ترى ما الذي يحدث عندما تستخدم الأدوات لقياس مركبات مختلفة ؟ أو لمزيد من الدقة والوضوح ، دعونا نتأمل في التجربة التالية : لنفرض أن ازواجاً من البروتونات قد وضعت معاً في الحالة الأحادية ، وبالطريقة نفسها المتبعة في التجارب السابقة ، ثم أتيح لها أن تنفصل تحت ظروف مماثلة . عندئذ سيتم اختبار كل بروتون لاجل مركبة سبين واحدة هي A أو B أو C ، ولكن أي المركبات هي التي قيست ، فهذا متروك للمصادفة وحدها . ففي بعض الأحيان ، قد يصادف أن تقاس المركبة نفسها لكلا البروتونين في الزوج الواحد ، ولكن هذه النتائج تهمل لأنها لا تعطي معلومات جديدة . أما الأزواج الأخرى فلابد أنها مكونة : إما من بروتون اختبر على المحور A والأخر على المحور B، وإما من بروتون اختبر على المحور A والآخر على المحور C وإما من بروتون اختبر على المحور B والآخر على المحور C . ومنعا للإطالة ، سأدل على الأزواج في كل فئة من هذه الفئات الثلاث على التوالي بـ AB, AC, BC ، وإذا ثبتت لأحد الأزواج النتيجة A^+ لأحد البروتونين و B^+ للآخر ، ندل عليه بالزوج A^+B^+ ، وأما عدد الأزواج من هذا النوع فندل عليه بالرمز $n[A^+,B^+]$. ترى هل يمكن توقع علاقة بين هذه الكميات ؟

الجواب : نعم . ففي عام ١٩٦٤ اكتشف ج.س.بِل John S. Bell من المركز الأوروبي للبحث النووي (CERN) علاقة من هذا النوع . فقد برهن بِل أن معتقدات النظريات الموضعية الواقعية تفرض على أي عينة كبيرة من أزواج البروتونات التي تكون في الحالة الأحادية وجود حد (أدنى أو أعلى) لمدى العلاقة التي يمكن توقعها عندما تقاس مختلف مركبات السبين . وهذا الحد يعبر عنه بشكل متراجحة تدعى اليوم متراجحة بِل . فعلى فرض أن الشروط التجريبية المبينة أعلاه قد تحققت ، فإن هذه المتراجحة تنص على أن عدد الأزواج A^+B^+ لا يمكن أن يزيد على عدد الأزواج A^+C^+ . مع الأزواج B^+C^+ أو يعبر عن المتراجحة كما يلي .

$$n[A^+B^+] \leqslant n[A^+C^+] + n[B^+C^+] .$$

وهناك متراجحات عدة مماثلة يمكن تشكيلها بتبديل الرموز دورياً أو بقلب الإشارات .

ذلك لأن الاتجاهات التي عينت عليها مركبات السبين ، يمكن اختيارها كيفما اتفق الأمر . فهذه الصيغ كلها يمكن تبديل إحداها بالأخرى . غير أنني لن أعالج هنا سوى هذه .

* * *

يمكن أن نبرهن على متراجحة بِل ضمن سياق النظريات الموضعية الواقعية ، وذلك باتباع إثبات مباشر مأخوذ من نظرية المجموعات الرياضية . ومن المناسب أن نبدأ بفرض يخالف الواقع ، فنفرض أن هناك وسيلة لقياس كلٍ من مركبتي سبين جسيم إفرادي بمعزل عن الأخرى ، ونفرض أن هذه الأداة المستحيلة أظهرت أن هناك بروتوناً معيناً مركبتا سبينه هما A^+ و B^- ، وأما المركبة الثالثة C فلم تقس ، ولكن لا يمكن أن يكون لها سوى واحدة من قيمتين موجبة أو سالبة . وعلى هذا فإن البروتون المقاس يجب أن يكون عنصراً من إحدى مجموعتين من البروتونات : إما المجموعة التي مركبات سبيناتها $A^+B^-C^+$ وإما المجموعة التي مركبات سبيناتها $A^+B^-C^-$ ، وليس هناك خيار ثالث .

فإذا اكتشفت عدة بروتونات مركبات سبينها A^+B^- ، فإن باستطاعتنا أن نكتب معادلة حول عددها .

$$N(A^+B^-) = N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-)$$

ولكي نتجنب الالتباس استعملنا الرمز $N(A^+B^-)$ ليمثل عدد البروتونات الإفرادية التي مركبتا سبينها A^+,B^- ، والرمز $n[A^+,B^-]$ ليمثل عدد أزواج البروتونات التي أحد البرتونين فيها له مركبة A^+ والآخر له مركبة B^- ، وأما المعادلة أعلاه فتنص على حقيقة واضحة وهي أن أي مجموعة من الجسيات عندما تنقسم إلى جزأين ، فإن عدد الجسيات الكلي في المجموعة الأصلية يجب أن يساوي مجموع عددي جزأيها .

والبروتونات التي لها مركبتا سبين A^+C^- يمكن تحليلها بالطريقة نفسها تماماً ، بحيث أن كل بروتون من هذا النوع يجب أن يكون عنصراً من واحدة من المجموعتين $A^+B^+C^-$ أو $A^+B^-C^-$ ، فالعدد الكلي $N(A^+C^-)$ يجب أن يساوي المجموع

$N(A^+B^+C^-) + N(A^+B^-C^-)$. والآن ، يمكن أن نسير خطوة أبعد : إذا كان عـدد البروتونـات $N(A^+C^-)$ يســاوي $N(A^+B^+C^-) + N(A^+B^-C^-)$ ، فلابد أن يكون أكبر من ، أو يساوي على الأقل $N(A^+B^-C^-)$ (ويتم التساوي بين المجموعتين إذا كانت المركبات B سالبة لجميع الجسيمات ، بحيث أن الجزء $A^+B^+C^-$ فارغ ، وإلا فإن العدد $N(A^+C^-)$ أكبر . أو بعبـارة أخرى : إن جزءاً من الكـل لا يمكن أن يتجـاوز الكـل) . وهذه الحجـة ذاتها يمكن اتباعها ثانية لإثبات أن عدد البروتـونــات التي مـركبتـا سبـينـهـا B^-C^+ يجب أن يســاوي المجمـوع $N(A^+B^-C^+) + N(A^-B^-C^+)$ ، فيجب بالتالي أن يكون $N(B^-C^+)$ أكبر من $N(A^+B^-C^+)$ ، أو على الأقل يساويه .

لنتأمل ثانية أول معادلة ذكرناها أعلاه :

$$N(A^+B^-) = N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-)$$

لقد برهنا منذ قليل على أن $N(B^-C^+)$ أكبر من $N(A^+B^-C^+)$ أو على الأقل يساويه. وهذا العـدد الأخير هو أول حد من الطرف الأيمن من المســاواة . كما برهنا أيضــاً أن $N(A^+C^-)$ هو أكبر من $N(A^+B^-C^-)$ أو على الأقل يساويه . وهذا العدد الأخير هو الحد الثاني من الطرف الأيمن في المساواة . (فإذا استبدلنا بحدي الطرف الأيمن في المساواة أعلاه العددين الأكبر منهما ، عندئذ يجب تبديل إشارة المساواة إلى إشـارة أخرى هي « أقل من أو يساوي » . فتكون النتيجة هي المتراجحة التالية .

$$N(A^+B^-) \leq N(A^+C^-) + N(B^-C^+)$$

وعلى الرغـم من أن هذه المـتراجحــة قد نتجت بطـريقـة منهجيــة ، إلا أنـه لا يمكن اختبارها مباشرة بالتجربة . إذ مامن أداة يمكن أن تقيس مركبتي سبين بروتون واحد وبشكل مستقل . ذلك أن التجارب التي يؤخذ بها ، لا يمكن أن تتناول بروتونات إفرادية ، ولكنها تتناول أزواجاً مترابطة منها ، ثم إنه لا حاجة لإجراء قياسات مستحيلة كهذه . افرض مثـلاً أن بروتوناً من أحد الأزواج قد قيست مركبة سبينه على المحور A ووجد أن لها القيمة A^+ ، عندئذ لا يمكن إجراء قياسات أخرى على هذا الجسيم ، ولكن شريكه يمكن اختباره لمعرفة مركبة سبينه على المحور B ، ولنفرض أنها كانت B^+ ، وأما

القياس الثاني ، الذي يمكن أن يكون قد أجري في موضع مختلف ، بعدما تباعد البروتونان لبعض الوقت ، فهو يحمل معلومة إضافية عن حالة البروتون الأول . أو بوضوح أكثر : إن وجود رابطة سلبية حصراً ، يحتم على البروتون الأول ، الذي عرف عنه منذ قليل بالقياس المباشر أن له مركبة سبين A^+ ، أن يكون له أيضاً المركبة B^-[١] .

* * *

بهذه الوسائل إذاً يمكننا أن نستفيد من ملاحظة زوج بروتونات أحدهما له مركبة A^+ والآخر له مركبة B^+ ، وذلك باتخاذ هذه الحالة دليلاً على وجود بروتون مفرد بمركبتين A^+B^- (وهو البروتون الأول في الزوج) . أضف إلى ذلك ، يمكن أن نبرهن بأدلة إحصائية أن $n[A^+B^+]$ أي عدد الأزواج المزدوجة الإيجاب يجب أن يكون متناسباً مع $N(A^+B^-)$ أي عدد البروتونات الإفرادية التي سبينها A^+B^- . و للسبب نفسه يجب أن يكون $n[A^+C^+]$ متناسباً مع $N(A^+C^-)$ وكذلك $n[B^+C^+]$ متناسباً مع $N(B^-C^+)$ وثابت التناسب في هذه الحالات الثلاث هو نفسه . وفي حالة بروتونات إفرادية (كنا قد جعلنا كلاً منها موضوعاً لقياس خيالي مضاعف) برهنا منذ قليل على متراجحة تظهر أن $N(A^+B^-)$ لا يمكن أن يكون أكبر من مجموع حدين $N(A^+C^-) + N(B^-C^+)$ فيمكننا أن نضع الآن مكان هذه الكميات (التي لا تقاس) الأعداد المتناسبة معها من أزواج البروتونات المزدوجة الايجاب ، فتكون العبارة الناتجة :

$$n[A^+B^+] \leq n[A^+C^+] + n[B^+C^+]$$

وهذه هي متراجحة بِل .

ومن الطبيعي أن هذه المتراجحة لا يمكن اثبات صحتها ببرهان كهذا إلا

---

(١) من هذه النقطة ينطلق اعتراض أينشتين وبودولسكي وروزن ، فهم يرون أن البروتون الأول المفرد قد عرفت له مركبتان في آن واحد معاً بالتحديد خلافاً لعلاقات الارتياب،وهم يعتمدون في استنتاجاتهم ضمناً على النظريات الموضعية الواقعية التي تنص على أنه لا يمكن أن تظل هناك رابطة بين البروتونين بعد أن ابتعدا مسافة كافية . وهذا ما يتعارض مع نتائج ميكانيك الكم ، وهو مايريد كاتب المقال أن يؤكد أن التجربة تنفيه أيضاً ليصبح مؤكداً أنه مامن استقلال للجسيم في موضعه عن الجسيم الآخر .

إذا كانت المسـلمـات الثلاث في النظريات الموضعية الواقعية صـالحة . إذ إنه هنا بالفعل يتجلى تطبيقهـا الأهم (ولكن الأكثر إثارة للشك) . لأننـا إذا سـلمنا جدلاً بصحة المسلمات ، ولو بقصد البرهان على الأقل ، فمن الواضح عندئذ أن متراجحة بِل ستكون محققة . ثم إن توجيه المحاور A, B, C لم يتحدد في أي موضع ، فالمتراجحة لابد أن تكون صالحة مهما كانت المحاور المختاره . والخرق الوحيد الممكن للمتراجحة يمكن أن ينجم عن مصادفة إحصائية خارقة للعادة ، إذ قد يتفق أن تظهر جسيمات عديدة مركبات سبينها A^+ و B^+ وذلك بمحض المصادفة ، غير أن احتمال مثل هذه المصادفة يقرب من الصفر كلما زاد عدد الجسيمات التي نجري عليها الاختبار .

وهكـذا فـإن مـتراجحـة بِل تشكـل توقعـاً واضحـاً لمـا ستسفر عنـه التجربة . هذا ، ويمكن لقواعد ميكانيك الكم أن تستخدم أيضاً في توقع نتائج هذه التجربة نفسها . غير أني لن أعرض تفاصيل الكيفية التي يصلون بها إلى هذا التوقع من شكلية ميكانيك الكم الرياضية . ومع ذلك يمكن أن نذكر أن الطريقة واضحة تماماً وموضوعية ، بمعنى أن أي امرئ يطبق القواعد تطبيقاً سـليماً سيصـل إلى النتائج نفسها . وسيجد مستغرباً أن توقعات ميكانيك الكم تختلف عن توقعات النظريات الموضعية الواقعية . ونخص من ذلك أن ميكانيك الكم يتوقع عند اختبار المحاور A, B, C بشكل معين ، أن تخرق متراجحة بِـل ، بحيث نجـد أزواج بـروتونـات A^+B^+ أكثر مما نجد من الأزواج A^+C^+ و B^+C^+ معاً . الأمر الذي يعني أن النظريات الموضعيـة الواقعيـة تتعـارض مباشرة مع ميكانيك الكم .

وهنـا يضعنـا هذا التعـارض أمام سؤالين : أولاً ، ما حكـم الوقائع التجريبيـة في هذا الشـأن ؟ أو ، هل تتحقق متراجحة بِل ، أم أن التجربة تكذبها ؟ إن الاختبار التجريبي ، مهمـا كانت نتيجته ، لابد أن يؤدي إلى شرخ من نوع ما ، إما في قواعد ميكانيك الكم ، وإما في النظريات الموضعية الواقعية . ثم يلي ذلك السؤال الثاني : ما هي المسلمة الخاطئة الكامنة خلف النظرية المستبعدة ؟

لقـد كانت التجـربـة التي افـترضهـا أينشتـين وبودولسكي **Podolsky** وروزن

Rosen في عام ١٩٣٥ تتضمن قيـاس وضع الجسيات واندفاعهـا . أما التجربة حول مركبات سبين البروتون ، فقد درسها لأول مرة د . بوهم David Bohm عام ١٩٥٢ من كلية بيريك في لندن . ولكنه درسها أيضاً ضمن إطار تجربة فكرية ، ولم يُنظر في مسألة تجارب فعلية تستطلع هذه القضايا إلا في عام ١٩٦٩ وبعد أن أتى بِل بمتراجحته . وقد درست إمكانية إجراء هذه التجارب من قبل ج.ف كلاوزر Johm F. Clauser من جامعة كليفورنية في بركلي ، و ر.أ. هولت R.A.Holt من جامعة غرب أنتاريو ، و م.أ. هورن Michael A. Horne و أ.شيموني Abner Shimony من جامعة بوسطن . وقد وجدوا أن متراجحـة بِل يجب أن تعمـم بعض الشيء لكي تصبح مؤهلة لإجراء تجربة عملية ، ولكن بشرط أن يظل بالإمكان إجراء اختبار ذي مدلول للخيار بين النظريتين .

كما لا يصـح أن نمضي دون الإشــارة إلى الصـعوبـات التقنيــة في مثـل هذه التجـربـة . ففي التجـربـة الفكـرية (يُصـوَّر) وصـول كلا البروتونين في أي زوج إلى الأدوات ، وبإمكـان الأدوات دائماً قياس مركبة السبين على المحور المختار دونما التباس . ولكن التجهيزات الواقعية لا يمكن أن تؤدي إلى هذه النتائج . فالكشافات ليست أبداً فعالة تماماً . فالكثير ، حقاً ، من البروتونات لا تسجلها أبداً . ونظراً لقصور الأدوات ، لا يمكن إعطاء عدد البروتونات المحسوبة في كل فئة مباشرة . فلابد من التسامح للتعويض عن النقص في فعالية الكشافات ، الذي يجب أن يضاف إلى ريبنا في النتائج .

* * *

لقـد أذيعت منـذ عام ١٩٧١ نتـائج سبع تجارب ، كانت ست منهـا لاتعتمد على قيــاس مركبــات سبـين البروتون ، بـل تقيس بدلاً منهــا استقطـاب الفوتونات التي هي كموم الإشعاع الكهرمغنطيسي ، والاستقطاب هو خاصة كل فوتون منسوب لسبين جسيم مادي . ففي إحدى سلاسل التجارب هذه ، كانت ترفع حالة الذرات في عنصر معين ونظيره إلى حالة مثارة ، وذلك بامتصاصها لضوء لازر ، ثم يتاح لها أن تعود إلى سويتها الأولى من الطاقة على مرحلتين . وفي كل مرحلة ، كان يصدر فوتون له طاقة أو طول موجة معينـة . فكـانت الفوتونات تبتعد في اتجاهين متعاكسـين ، ولها استقطابان

متعاكسان . أو بعبارة أخرى ، لوقيس استقطاب كلا الفوتونين (في زوج) على طول محور واحد ، للوحظ وجود رابطة سلبية حصراً .

والفروق في هذه التجارب بين الأدوات المثالية وبين الأدوات الواقعية فروق بسيطة لاتعد شيئاً . ولكن لا توجد وسيلة واحدة يمكن أن تعترض الفوتون وتعلمنا مباشرة عن استقطابه . بل لابد من وجود وسيلتين ، مرشح وكاشف . فالمرشح ضروري لكي يسمح بمرور الفوتونات التي لها الاستقطاب المختار ، ويوقف أو يحرف الفوتونات الأخرى . والكاشف يحصي عدد الفوتونات التي تمر خلال المرشح . والأداتان ليس بينهما واحدة متقنة كاملة ، لذلك فإن الاخفاق في تسجيل فوتون لايعني بالضرورة أن استقطابه خطأ .

وهناك أيضاً تجارب أجريت على أشعة غما التي فوتوناتها عالية الطاقة . فقد أمكن الحصول على هذه الأشعة بتفاني الكترونات مع مضاداتها ، أي بوزيترونات . ومثل هذا التفاني يؤدي إلى ظهور حزمتي أشعة غما ، تنبعثان في اتجاهين متعاكسين ولهما استقطابان متعاكسان . لذلك ، تكافئ هذه التجارب ، شكلياً ، التجارب الذرية ، إلا أن التجهيزات المطلوبة مختلفة عنها تماماً . فالكاشفات ، بوجه عام، فعالة أكثر مع الفوتونات العالية الطاقة . أما المرشحات الاستقطابية فهي فعالة أكثر مع الفوتونات المنخفضة الطاقة .

وفي تجربة أخرى قيست الروابط بين مركبات سبين البروتونات ، فكانت لهذا السبب مشابهة للتجربة الفكرية الأصلية . وقد تم الحصول على أزواج البروتونات بحقن بروتونات منخفضة الطاقة نسبياً في هدف مؤلف جزئياً من ذرات الهدروجين ، إذ تتألف نواة ذرة الهيدروجين من بروتون واحد . فعندما يصطدم بروتون وارد بنواة هذه الذرة ، يتفاعل البروتونان موقتا ليصبحا في الحالة الأحادية . ولذلك سيغادران الهدف معاً ، متقاسمين اندفاع البروتون الوارد . وإذا لم يضطربا ، فإنهما يبقيان عندئذ في الحالة الأحادية . وعلى كل حال فإن القياسات المبدئية لمركبة السبين نفسها للبروتونين تعطي نتائج متعاكسة .

وكذلك ، تتألف الأدوات المخصصة لتجارب على أزواج البروتونات من

مرشحات وكاشفات . وفي إحدى التجارب التي تمت كان المرشح رقاقة كربون تنثر كل بروتون في واحد من كاشفين تبعاً لقيمة المركبة المقيسة .

ومهما يكن نوع الجسيمات التي تتناولها الدراسة ، فإن التجارب تتم على ثلاث مراحل كل منها سلسلة قياسات مضاعفة . فهناك ثلاثة محاور A, B, C يتم اختيارها عامة بحيث تكون الزوايا بينها مركزه عند القيم التي يتوقع أن يبلغ فيها التعارض أقصاه بين ميكانيك الكم وبين النظريات الموضعية الواقعية . وهكذا يخصص أحد المرشحين لاستقبال الجسيمات ذات الاستقطاب ، أو مركبة السبين A^+ ، ويخصص الآخر لمرور الجسيمات التي مركبة سبينها B^+ . وبعد أن يتم تسجيل عدد كبير بما يكفي من الجسيمات في هذا التشكيل ، تدار المرشحات لتقيس المركبات على المحورين A و C . فتسجل المزيد من المعطيات . وأخيراً تدار المرشحات ثانية إلى المحورين B و C . وتحصى حالات التوافق بين السبينين في كل توجه ، ثم تجري بعض التصحيحات على عدم كفاية التجهيزات . وعند ذاك تبقى المسألة عملية جمع بسيطة لمقارنة النتائج مع متراجحة بِل .

لقد أجريت سبع تجارب[1] ، كانت خمس منها متفقة مع توقعات ميكانيك الكم ، بمعنى أنها أشارت ، عند خيارات معينة للمحاور A, B C إلى خرق متراجحة بِل . أما التجربتان الباقيتان ، فقد أعطتا روابط لاتتعدى تلك التي تبيحها متراجحة بِل ، وهي لذلك تدعم النظريات الموضعية الواقعية . فالنقاط المسجلة لصالح ميكانيك الكم هي خمس مقابل اثنتين . والحقيقة أن تأييد ميكانيك الكم أقوى مما تدل عليه هذه النسبة في الظاهر . إذ إن هناك سبباً يدعونا لأن ننسب مصداقية أكثر للتجارب الخمس التي خرقت متراجحة بِل ، وهو أنها تمثل عينة أوسع من المعطيات ، فهي إحصائياً أكثر دلالة . كما أن بعض هذه التجارب أجري بعد مانشرت النتيجتان الشاذتان ، فكانت تتضمن تحسينات على الأدوات كان الغرض منها طبعاً تجنب الانحراف الذي أمكن أن يسجل لصالح النتيجتين المعارضتين (لميكانيك الكم) ثم إن كلاوزر وشيموني أشارا إلى أن هناك مبرراً إبيستيمولوجيا لأن نغض النظر عن التجربتين اللتين لاتتفقان مع الأكثرية .

---

(١) هذا طبعاً قبل تاريخ نشر المقال ، أي قبل عام ١٩٧٩ ، ويمكن أخذ فكرة عن هذه التجارب من الشكل ٢ ــ ٣ في ص ٢٤٦ .

فميكانيك الكم يتوقع رابطة فضفاضة [1] بين الحوادث ، بينما تتوقع النظريات الموضعية الواقعية رابطة ضيقة . لذلك ، يمكن لأنواع كثيرة من الخلل النظامي في تصميم التجربة أن تحطم وضوح الرابطة الحقيقية ، فتعطي نتائج ضمن الحد الذي قررته متراجحة بِل . ومن جهة أخرى ، يصعب أن نتخيل خطأ تجريبياً يمكن أن يؤدي إلى رابطة مزيفة في خمس تجارب . والأهم من ذلك أن نتائج هذه التجارب لاتكتفي بخرق متراجحة بِل ، بل إنها تخرقها خرقاً يتفق كل الاتفاق مع توقعات ميكانيك الكم . أما أن تأتي نتائج التجارب الخمس على ماهي عليه الآن ، نتيجة مصادفة بحته ، فهذا مالابد أن يقع نتيجة مصادفة إحصائية خارقة لاتصدق ، نظراً لعدد الجسيمات الكبير الذي أجريت عليه التجارب الآن .

هذا ، ولازال هناك مزيد من الاختبارات لمتراجحة بِل قيد النظر . وثمة تجربة على الأقل جاهزة للتحضير . ومع ذلك فقد تكونت لدى الفيزيائيين المعنيين بهذه المسألة ، ثقة متأصلة ، قائمة على النتائج الخمس المبينة التي أقرت نتيجتها حالياً . وهي أن متراجحة بِل لاتصح عند اختيار المحاور A, B, C بأوضاع معينة . وأن بعض النظريات الموضعية الواقعية هي لهذا السبب خاطئة .

* * *

ترى ، إذا صح لنا أن نقول إن النظريات الموضعية الواقعية قد برهن خطؤها ، فعلى أي واحدة من المسلمات الثلاث التي قامت عليها هذه النظريات تقع المسؤولية ؟ إن أول مرحلة في الإجابة عن هذا السؤال يجب أن تؤكد أنه مامن افتراضات إضافية قد تسربت عند تصميم صيغة الاختبار التجريبي .

لكن ماحدث ، هو أن الحاجة دعت إلى افتراض واحد مساعد . ذلك أنه كان لابد ، مع قصور الأدوات من الناحية العملية ، من تعميم متراجحة بِل تعميماً لا يذكر . كما كان لابد من افتراض هذا التعميم سلياً لعدم إمكانية البرهان عليه . ومع

---

(١) إذ إن ميكانيك الكم لايحتم خرق متراجحة بِل ، ذلك أن هذه المتراجحة يمكن أن تتحقق بحسب ميكانيك الكم ويمكن ألا تتحقق . بينما في النظريات الموضعية الواقعية فإن تحققها محتم . (المترجم)

ذلك ، نستبعد جداً أن تتبدل الظاهرة ضمن هذا الظرف إلى الحد الذي لايقتصر على جعل نتائج التجربة تخرق متراجحة بِل ، بل يجعلها متسقة مع توقعات ميكانيك الكم . وعلى كل حال ، يمكن لتجارب محسنة في المستقبل أن تختبر متراجحة بِل بدون التعميم . ثم إن الفرض المساعد يبدو غير أساسي كالمسلمات الثلاث الأخرى ، إذ يمكن إخضاعه للاختبار . لذلك لن ننظر فيه هنا بعد الآن .

على أن هنـاك شيئـاً يمكن أن يكون مدعاة لإعادة النظر بسبب الفروض غير المسـلم بها ، وهو برهان متراجحـة بِل . فقد صيغ هذا البرهان بالفعـل على افتراض صلاحية المنطق العادي المثنوي القيم ، حيث تكون الدعوى صادقة أو كاذبة (ولاثالث لهما) ، وأي مركبة للسبين إما موجبة وإما سالبة . ولكن بعض تأويلات ميكانيك الكم أدخلت فكرة منطق متعدد القيم . غير أن هذه المحاولات ا لمقترحة ليس لديها مايقنع بشأن التفكير ببديل للمنطق المثنوي القيم . فإلى أن يصاغ نظام للبرهان كهذا يحسن بنا أن نتجاوز هذه المسألة .

ينـظـر أحيـانـاً إلى هـذه التجـارب التي انطـلقت من أفكـار أينشتـين وبودولسكي وروزن على انها مجرد اختبار لنظريات المتغير الخفي . وهذا حق ، فهذه النظريات يجب أن تختبرها التجارب ، ولكن يجب التشديد على أن وجود متغيرات خفية ليس مسـلمة إضـافية للنظريات الموضعية الواقعية . بل على العكس ، إن الافتراضـات الثلاثة الأصلية هي التي تستلزم وجود متغيرات تبرز الخواص الحتمية للجسيم . ولنذكر هنا أن عالم النفس لم يفترض أن اختباره المبتكر قد قاس أي صفة حقيقية للموضوع الخاضع للتجربة ، بل الأصح أنه استنتج وجود هذه الصفة بعدما لاحظ رابطة حميمة . وبالطريقة نفسها ، فقد استُنتجَ وجود متغيرات خفية من الرابطة السلبية التي اكتشفت عندما قيست مركبة سبين واحدة لبروتونين وهما في الحالة الأحادية .

نعـم ، قد لانستطيع البرهـان جـازمـين على عـدم وجـود فروض إضـافيـة تتسـرب إلى الأدلة الداعمـة للنظريات الموضعية الواقعية . ولكن تسـلسـل الأفكار من البساطة بحيث لو وجدت فيها فروض أخرى مستترة لأمكن التعرف إليها بسهولة . وحتى الآن ، لم يشر أحد إلى شيء من ذلك . فما علينا ، كما يبدو ، إلا أن نتحرى بانتباه

مسـلمـات هذه النظريات الثلاث : الواقعية ، وحرية استخدام الاستقراء ، وانفصـالية أينشتين :

والواقعيـة هي أهم هذه المسـلمـات . ويمكن أن تعرف رسمياً على أنها الإيمان بأن مجرد وصف المعطيات ليس كل مايجب أن نتطلبه من النظرية . حتى أن مجرد قاعدة اختبار حسي ، لتوقع نماذج القياسات القادمة ليس كافياً . إذ يتطلب العقل شيئاً أكثر من ذلك ، وهذا الشيء ليس الحتمية بالضرورة ــ فالعشوائية ليس فيها لامعقولية جوهرية ــ بل يتطلب العقل ، على الأقل ، شرحاً موضوعياً للانتظام regularity المشاهد . أو بعبارة أخرى يتطلب بيان اسباب (خلف هذا الانتظام) . وهذا المطلب تكمن خلفه فكرتنا الحدسية عن أن العالم الخارج عن الذات ، واقعي ، ويتمتع على الأقل ببعض الخواص التي توجد بمعزل عن شعور الإنسان .

لقد رفض عدد من الفلاسفة الذين يمكن أن نجمعهم تحت صفة وضعيين ، وجهة النظر الواقعية هذه . وهؤلاء الوضعيون لايؤكدون بأن العالم الخارج عن العقل غير موجود ، بل كل مافي الأمر أنهم يرفضون كل حكم يتحدث عن واقعية خارجية ولايستند مباشرة إلى مشاعرنا الحسية ، باعتبار أن هذا الحكم خالٍ من كل معنى ؟ وقد كان لبعض الوضعيين الراديكاليين في القرن العشرين تأثير مرموق ، وإن لم يكن مباشراً ، في تفكير الفيزيائيين النظريين .

ولاشك أن اتخاذ موقف وضعي يمكن أن يخفف من حدة الإحساس بالمفارقة الذي أثاره اكتشاف الإخلال بمتراجحة بِل . وكان هذا أول طرق الخلاص التي اقترحت منذ زمن طويل . إلا أننا حين ناخذ بعين الاعتبار كافة النتائج المترتبة على رفض الواقعية ، عندئذ يبدو هذا الرفض أقل جاذبية ، نظراً للخسارة الفادحة التي يؤدي إليها . فالوضعية ترى أن لامعنى ، في سياق هذه التجربة ، لأن نعزو للجسيم اي شيء يشبه مركبة سبين محدده قبل قياس هذه المركبة ، وأن الكمية الوحيدة التي لها واقع يمكن تحققه هي الملاحظة نفسها والشعور الحسي . وترى أيضاً ، أن مطلب عالم النفس بتفسير موضوعي للرابطة الملاحظة التي يشاهدها ، هو مطلب يجب رفضه بشدة . ولكن لو

رفضنا فعلاً كل بحث عن الأسباب الكامنة خلف الانتظام المشاهد ، لغدت مهمة العلم برمتها مجرد مشروع تافه ، ولتحول العلم إلى مجموعة من الوصفات التي تساعد على التنبؤ بالمشاهدات المقبلة بعد معرفة المشاهدات السابقة ، بل لأصبح كل تصور للعلم على أنه « دراسة الطبيعة » تصوراً مستحيلاً . فالطبيعة تغدو شبحاً لاغير . وللمرء أن يتخيل عندئذ فيزياء تقوم على المبادئ الوضعية التي تريد التنبؤ بجميع الروابط الممكنة بين الحوادث ، مصممة على ترك العالم كله غير مفهوم . إن المرء لن يجد أمامه ، بعد أن يرى النتائج القصوى المترتبة على نفي الواقعية ، إلا أن ينحاز إلى جهة التمسك بهذه المسلمة الأولى .

ثم إن الواقعية تأتي من جهة أخرى بالحجة الداعمة للنظريات الموضعية الواقعية . فهي التي تبرر التسليم بحرية استخدام الاستقراء . والاستقراء ، هو الذي يسمح للفيزيائي بأن ينتقل عن طريق الاستقراء والتعميم **Extrapolation** انطلاقاً من مجموعة روابط سلبية مشاهدة ، إلى الاستنتاج بوجه عام أن كل بروتونين في الحالة الأحادية ، لابد أن يكون لهما قيمتان متعاكستان من مركبة سبين واحدة ــ حتى ولو لم يجر قياس أي واحدة من المركبات . ثم إن التعميم (أو التمليس الخارجي) كان مرحلة أساسية في البرهان على متراجحة بِل ، في حين ليس ثمة ما يدعم هذا التعميم ، لو أن مفهوم الخواص التي لم يجر قياسها كان خالياً من كل معنى .

وقد يرى بعضهم أن استخدام الاستقراء على هذا النحو هو حلقة ضعيفة في تسلسل البرهان . فبعد ظهور مقالة أينشتين وبودلسكي وروزن بمدة قصيرة ، نشر نيلزبور **Niels Bohr** رداً دافع فيه عن كالية ميكانيك الكم في وصفه للطبيعة . وكان جوهر نقده ، هو أن استخدام أينشتين للاستقراء لامبرر له . ويعد الرد الذي قدمه بور وثيقة أساسية ، إذ ورد فيها مايعرف اليوم بتفسير مدرسة كوبنهاغن لميكانيك الكم . وكان برهانه يقوم على حجة أن الجسيم والأداة المحكمة لإجراء قياس محدد عليه ، يشكلان ، مع بعض الاعتبارات ، جملة مفردة واحدة يجب تبديلها تبديلاً أساسياً إذا ماتغير وضع الأداة . ولهذا السبب لايسمح بالقيام بأي استدلال حول حالة الجسيم دون أن يحدد في الوقت نفسه وضع الأدوات التي ستتبادل معه التأثير .

لقد كان لوجهة نظر بور تأثير واسع ، كانت بمعنى ما ، جديرة به . فبعد كل اعتبار ، أظهرت أعمال حديثة في إطار النقاش الدائر هنا ، بأنه في هذا المجال ، كان أقرب إلى الحقيقة من أينشتين . وعلى الرغم من ذلك ، فإن أفكار بور نفسها أصبحت عند التأمل في جوهرها موضوعاً لاعتراضات مماثلة تماماً لتلك التي أثيرت ضد الرجوع إلى الوضعية . فالواقعية ، باعتبار أنها تضفي معقولية قصوى على حرية استخدام الاستقراء ، فهي لذلك يمكن أن تحاجج بأن بور لم يكن واقعياً ، أو على الأقل ليس متسقاً مع ذاته . وأن أي تفسير لتجارب الرابطة عن بعد ، يستند إليه بور في الرد على أينشتين وبودولسكي وروزن ، يمكن أن يثبت في النهاية أنه لايتمشى حتى مع تفسير معتدل للواقعية .

* * *

إذن ، إذا كان لابد من التمسك بالواقعية وبحرية استخدام الاستقراء ، فلن يبقى لنا لتفسير الإخلال بمتراجحة بِل سوى أن نتخلى عن افتراض انفصالية أينشتين . ويفهم من الانفصالية ، بحسب التجربة النفسية ، أنها تعني أن الرجل والمرأة ، لايمكن ، بعد انفصالهما ، أن يتصل أحدهما بالآخر . أما افتراض الانفصالية في التجربة الفيزيائية فكان يعبّر عن الفكرة المقبولة حدساً وهي أن مركبات سبين بروتون ، لاتأثير لها على مركبات سبين البروتون الآخر ، فيما لو أصبح الجسيمان بعيدين كلاً في طرف . ولكن فرض الانفصالية الأشد عند أينشتين ، لايمنع تأثيراً متبادلاً كهذا إلا إذا كان ينتشر بسرعة أكبر من سرعة الضوء . وهذا ، كما بينت ، فرض يجب أن ينظر إليه على أنه مثار شك إلى حد بعيد .

ولكن قبل التأمل في عواقب هذا الاستنتاج ، يجدر بنا أن نشير ، إلى أنه مامن تجربة قد أنجزت ، وكانت قد اختبرت فعلاً فرض أينشتين عن الانفصالية بشكل صارم ، حقاً أن أوضاع الأدوات في هذه التجارب كانت قد حددت (أو ثبتت) سلفاً بشكل جيد ، (وذلك تبعاً لمدى تطور فيزياء الجسيمات) . ولكن كان من المعقول أن يؤثر وضع إحدى الأدوات في الحوادث المشاهدة على الأداة الأخرى ، أو يمكن أن يؤدي إلى تعديل قيم متغيرات خفية عند مصدر أزواج البروتونات . وفي جميع الأحوال لم يكن ثمة حاجة لأن ينتقل هذا التأثير بأسرع من الضوء . ولكن هذه الحالة (حالة تأثير أبطأ من

الضوء) يمكن استبعادها بأدوات يمكن تغيير أوضاعها بسرعة . إذ يجب ألا يتخذ قرار بقياس إحدى مركبات سبين مابكاشف ، إلا حين يكون الوقت قد تأخر بالنسبة لأي تأثير لهذا القرار لأن يصل، ولو انتقل بسرعة الضوء، إلى الأداة الأخرى أو المصدر ، في زمن يستطيع أن يبدل فيه من نتيجة القياس الثاني (١) . وهذه التجربة يجريها الآن أ.أسبيه Alain Aspect من معهد البصريات في جامعة باريس .

ولكن يبدو ــ بانتظار نتائج تجارب أسبيه ــ أنه بغض النظر عن هذه المسألة نهائياً ، وهي كم يمكن لتأثير افتراضي أن يسرع في الانتقال من أداة إلى أخرى ، فإن التأثير نفسه غير مقبول إلى أبعد حد . لأنه تأثير كان قد تطلبه تبدل المشاهدات المتباعدة ليكون ، بالتحديد ، قادراً على إحداث إخلال في متراجحة بِل ، وعلى هذا ، يبدو من الأفضل أن نبحث عن تفسير آخر ، وأن نفترض أنه ، إذا خرقت الانفصالية العادية ، فإن انفصالية أينشتين أيضاً تخرق .

لقد درست بروتوني الزوج الواحد على أنهما كيانان مستقلان يصلان معاً إلى الهدف ، ثم يتحركان عندئذ مستقلين ثانية . ولكن ، كان يمكن أيضاً اعتبارهما عنصرين من منظومة فيزيائية (واحدة) تتكون أثناء التفاعل الأول . ثم تصبح بالتدريج أكثر امتداداً في الفضاء إلى أن تدب فيها الفوضى وتختل في أول قياس . والوصفان في الحقيقة متكافئان من وجهة نظر الانفصالية ، ففي كل حالة ، يتطلب الإخلال بانفصالية أينشتين تأثيراً آنياً عن بعد ، سواء أكان بين منظومتين مستقلتين ، أم في داخل منظومة واحدة ممتدة .

ترى ، أيستدعي هذا الأمر التخلي عن مبدأ انتشار الإشارات (بسرعة منتهية) ؟ يجدر بنا ألا نعطي إجابة متسرعة عن هذا السؤال . فهذا المبدأ كان قد اتخذ مسلمة لنظرية النسبية التي لن يستطاع جعلها متسقة بدونه . والإشارات التي تخرق هذا

---

(١) أي يجب أن يكون الفوتونان قد ابتعدا بعداً كافياً . ففي تجربة أسبيه ، تبلغ المسافة بين محللي الاستقطاب 13 متراً وتحتاج إلى 40 نانوثانية ، بينما يغير توجه المحللين في 10 نانوثانية راجع مجلة العلوم عدد مايو / أيار 1989 (حقيقة العالم الكمومي) انظر الشكل (٢ ــ ٥) في ص ٢٤٨ . (المترجم)

المبدأ ، تفسح ، علاوة على ذلك ، مجالاً لمفارقات غريبة في السببية . منها أن المشاهدين في مراجع مختلفة يمكن أن يكتشفوا حادثاً ما « ناتجاً » عن آخر لم يحدث بعد . وعلى كل حال ، لا حاجة للقول ، إن التأثيرات الآنية التي تبدو لنا مظاهرها في تجارب الارتباط عن بعد ، لاتتطلب منا مثل هذه المراجعة المتطرفة للأفكار المسلم بها . إذ يبدو مؤكداً كل التأكيد ، أن هذه التأثيرات لايمكن أن تستخدم في نقل أي إعلام « مفيد » كالأوامر مثلاً أو التعليمات . فلا يمكن لحادث يسبب آخر أن يرتبط به بواسطة هذه الآلية . ذلك أن التأثيرات الآنية ، يمكن أن تنتقل فحسب بين حوادث ارتبطت سابقاً بسبب مشترك . وعلى هذا ، فإن مفهوم الإشارة يمكن أن يعاد تعريفه بحيث تغدو وسائل الاتصال التي تنقل إعلاماً مفيداً هي وحدها التي يمكن أن تدعى إشارات . وبذلك يصان مبدأ محدودية سرعة الإشارات .

غير أن هذا الحل أيضاً سيضعف الواقعية العلمية إلى حد ما . إذ تتدنى مرتبة القانون الأساسي القائل : « إن الإشارات لايمكن أن تنتقل بأسرع من الضوء »،من خاصته في الواقع الخارجي إلى سمة لتبادل التجربة الإنسانية لاغير . ومع أن هذه النتيجة تمثل مرحلة في الاتجاه نحو الوضعية ، فإن مفهوم الواقع المستقل أو الواقع الخارجي ، يمكن أن يظل مصاناً على أنه تفسير جائز لانتظام الأحداث في التجارب . ولكن من الضروري على كل حال أن تشمل هذه الواقعية ، ظاهرة الإخلال بانفصالية أينشتين على شكل خاصة لهذه الواقعية ، حتى وإن كانت خاصة متخفية ومناقضة للحدس . ولابد أن نذكر في هذا المجال أن رفض بور لحجة أينشتين بشأن المتغيرات الخفية يحمل ضمناً خرقاً للانفصالية . إذ إنه بني على فكرة غريبة ، وهي عدم قابلية منظومة الجسيمات وأدوات المراقبة معاً للتجزئة .

قد لايتصف البرهان الذي سار من رابطة مشاهدة إلى متراجحة بِل ، ثم إلى خرق انفصالية اينشتين ، بتعقيد متميز ، ولكنه ليس برهاناً مباشراً . فهل كان باستطاعتنا الحصول على النتيجة نفسها بطريقة مباشرة دون تعرج ؟ إن هذه النتيجة ، كما يظهر ، ماكان ممكنا اثباتها لولا متراجحة بِل ، ولكنها كان يمكن أن تكون موضع الظن ، وقد كانت كذلك بالفعل . ويأتي هذا الظن من أن دالة الموجة لجملة من

جسيمين أو أكثر ، هي بعامة كيان لاموضعي يلاحظ أنه ينهار فجأة ، أو حتى آنياً ، عند إجراء القياس . فإذا نظرنا إلى الموجة على أنها نوع من هلام حقيقي غريب ، فإن الانهيار الفوري كافٍ ، بكل وضوح ، لخرق انفصالية أينشتين . ومع ذلك ، لم يؤخذ هذا البرهان الساذج مأخذ الجد ، لأن التفسير التقليدي لميكانيك الكم لايطابق دالة الموجه لجملة ما مع مايقصد بواقعية الجملة أياً كانت . فبور ، على سبيل المثال ، كان ينظر إلى دالة الموجة لجملة ، على أنها مجرد وسيلة لإجراء الحسابات . أضف إلى ذلك ، أن دالة الموجة لجملة من جسيمات عديدة ، تقتصر على وصف هذه الجسيمات بتقريب يتجاهل نظرية النسبية . لذلك كان من الصعب أن تبدو بنيتها حجة قوية ضد انفصالية أينشتين . ولهذه الأسباب ، ظل ، ولسنوات قليلة خلت ، من الممكن أن نؤمن بالواقع الخارجي المستقل ، وأن ننظر في الوقت نفسه إلى انفصالية أينشتين على أنها قانون عام يشمل هذا الواقع .

* * *

هناك رد واحد معقول على تجارب الترابط عن بعد ، وهو أن النتيجة التي تصل إليها هذه التجارب لاجدوى منها . حقاً أن التجارب نفسها يمكن أن تمثل اختباراً نادراً وبالتالي مهماً لظاهرة ميكانيك الكم التي تشاهد على المدى الطويل . ولكن النتائج هي ماكان متوقعاً ، فهي تظهر أن النظرية على وفاق مع التجربة . وهي لذلك لاتغنينا بمعلومات جديدة . غير أن اتخاذ موقف كهذا سيكون سطحياً إلى أبعد حد . فما أنجزته هذه التجارب حتى الآن لم يقدم حقاً سوى القليل لميكانيك الكم . ولكن هذا الأمر لايجعل منها تجارب تافهة ، بل الصحيح أنه مؤشر على أن فائدتها آنية . إذ إن أي اكتشاف يفند افتراضاً أساسياً حول بنية العالم ، كان يؤخذ به طيلة هذا الوقت ، ونادراً ماتعرض للشك ، هذا الاكتشاف ، هو كل شيء ما عدا أنه مبتذل ، إنه إيضاح يستحق الترحاب .

إن أكثر الجسيمات ، أو تجمعات الجسيمات ، التي ينظر إليها عادة على أنها أشياء منفصلة ، كانت فيما مضى قد تفاعلت في وقت من الأوقات مع أشياء أخرى . كما يبدو أن خرق الانفصالية يتطلب أن تشكل هذه الأشياء ، بمعنى ما ، كمية تامة متكاملة

غير مجزأة . ففي عالم كهذا ، ربما كان من الممكن لفكرة وجود الواقع المستقل أن تحتفظ بمعنى ما ، ولكنه سيكون معنى مغايراً وبعيداً كل البعد عن تجربتنا اليومية .

المحتوى

القسم الثاني

رحلات جديدة إلى عالم الكم

التنضيد والإخراج
دار الشادي
دمشق ـــ تلفون ٢١٦٥٣٩

نظرية الكمّ وقصتها الغريبة

هيئة الطاقة الذرية السورية



هيئة الطاقة الذرية السورية

دمشق - ص.ب ٦٠٩١